
Étude de la dynamique de la silice après la conversion d'une prairie permanente tempérée en plantation de bambou (*Phyllostachys*)

Auteur : Villeneuve, Dounia

Promoteur(s) : Meersmans, Jeroen; Colinet, Gilles

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21452>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Étude de la dynamique de la silice après la
conversion d'une prairie permanente
tempérée en plantation de bambou
(*Phyllostachys*)

DOUNIA VILLENEUVE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLÔME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023 - 2024

**CO-PROMOTEURS: Pr. GILLES COLINET & Pr. JEROEN MEERS-
MANS**

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

© Any reproduction of this document, by any means whatsoever, is only allowed with the authorization of the author and the academic authority of Gembloux Agro-Bio Tech.

This document reflects only the views of its author.

Étude de la dynamique de la silice après la
conversion d'une prairie permanente
tempérée en plantation de bambou
(*Phyllostachys*)

DOUNIA VILLENEUVE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE
L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023 - 2024

**CO-PROMOTEURS: Pr. GILLES COLINET & Pr. JEROEN MEERS-
MANS**

Ce mémoire a été réalisé à la Faculté Gembloux Agro-Bio Tech de l'Université de Liège, dans le Département des Échanges Eau-Sols-Plantes. L'organisation d'accueil externe pour les mesures de terrain était le jardin botanique « De Kleine Boerderij ».

Remerciements

J'aimerais tout premièrement remercier Mr. Meersmans et Mr. Colinet, mes deux co-promoteurs pour m'avoir accompagnée tout au long de ce parcours. Merci pour votre bienveillance et vos encadrements qui furent inestimables. Travailler et apprendre avec vous que ce soit pendant les cours ou pour ce travail a été un honneur.

Merci à Marie Dincher, pour m'avoir fait confiance en me proposant ce projet, pour m'avoir initiée au MEB et pour sa bienveillance. Merci Nicolas, pour m'avoir encouragée du premier au dernier jour, pour avoir pris le temps de suivre l'avancée de mon travail, pour ta gentillesse et tes conseils tellement précieux.

Bedankt aan Mr. Oprins voor de mogelijkheid die u mij heeft gegeven om in uw botanische tuin De Kleine Boerderij te werken en om mij aan de bamboewetenschap te introduceren.

Je voudrais également remercier Émilie Marit, Jean-Charles Bergen, Pauline Biron et Raphaël Tarantino pour m'avoir aiguillée lors des expériences effectuées au laboratoire du GP. Merci également à Catherine Henrist du laboratoire Greenmat pour m'avoir accordé l'accès au MEB.

Merci à mes mousquetaires, mes sœurs, mes soleils. Vous avoir dans la vie est l'une des plus belles choses qui soit, Mektoub. Merci à toi Jo d'amour, hâte d'entamer ce nouveau bout de vie à tes côtés si ensoleillés. Lo, merci pour tout, love. Merci cher staff, Lou, Co, Paulet, Val, Helo, Nate, Tab, vous me rappelez qu'il y a de la bienveillance dans ce monde qui est hyper okay grâce à vous. Merci la TF, c'est tellement chouette de grandir avec vous. Merci à Sarah, cette pépite. Merci Mym, sans toi je pense que je n'y serais jamais arrivé, n'oublie jamais d'utiliser ton « imaginé », c'est très important. Merci Dodo, on termine ça ensemble ma caille. Merci Flo, pour tous ces moments complices et ces folles soirées de patinage artistique. Merci au grandissime Bar de l'AG et à ces deux équipes, qu'est-ce que je vous aime les gars. Merci au kiekekot/Code Bar, vivre avec vous était fou.

Merci à mes trois grands frères qui sont pour moi une source d'inspiration depuis toujours. Je suis tellement fière d'être votre sœur, des êtres que vous êtes et des petits êtres qui grandissent dans des univers merveilleux et remplis d'amour grâce à vous.

Pour terminer, je voudrais remercier mes très chers parents. Merci papa pour m'avoir appris que chaque plante a sa place dans son jardin. Choukrane mama, pour m'avoir enseigné à m'extasier devant chaque odeur et couleur de la nature. Merci à vous deux de m'avoir menée jusqu'ici, et de me soutenir dans chaque étape de la vie.

Merci aux Tirlons de ce monde.

Abstract

Given the importance of mineral elements in ecosystems and their crucial role in various ecological processes, it is essential to understand and manage their dynamics. Among these elements, silicon (Si) plays a fundamental role in plant nutrition and the carbon (C) cycle. This study focuses on the dynamics of silica (SiO_2) in soils as well as in bamboo biomass. A Belgian botanical garden with bamboo plots was used as the experimental site. Various samples were collected, including measurements of SiO_2 in both the aerial and underground biomass of bamboo, as well as in the soil. The study aimed to assess and compare SiO_2 stocks in the soil and biomass, as well as the forms of Si in different tissues of bamboo belonging to the same genus (*Phyllostachys*), using analytical methods and scanning electron microscopy (SEM) images.

The results show that SiO_2 stocks in bamboo are significantly lower than in the prairie, with *P. aureosulcata* having the lowest stock, followed by *P. nigra* and *P. aurea*. The conversion of the prairie to a bamboo plantation is identified as the main cause of this decrease. Leaching and washout of phytoliths could explain these differences. SEM images reveal the presence of phytoliths and Si deposits in various tissues, without showing notable differences in Si forms between species.

The thesis suggests several perspectives for future research, including separating the total Si reservoirs and assessing Si fluxes using lysimeters for a better understanding of Si dynamics in bamboo ecosystems.

Keywords : Belgium, bamboo, SiO_2 , stock, *Phyllostachys*, phytoliths, podzol, SEM

Résumé

Étant donné l'importance des éléments minéraux dans les écosystèmes et leur rôle crucial dans divers processus écologiques, il est essentiel de comprendre et de gérer leur dynamique. Parmi ces éléments, le silicium (Si) joue un rôle fondamental dans la nutrition des plantes et le cycle du carbone (C). Le présent travail se concentre sur la dynamique de la silice (SiO_2) dans les sols ainsi que dans la biomasse de bambou. Un jardin botanique belge possédant des parcelles de bambou a été utilisé comme terrain expérimental. Des échantillons variés ont été prélevés, incluant des mesures de SiO_2 dans la biomasse aérienne et souterraine des bambous, ainsi que dans le sol. L'étude visait à évaluer et comparer les stocks de SiO_2 dans le sol et la biomasse, ainsi que les formes de Si dans différents tissus des bambous appartenant au même genre (*Phyllostachys*), en utilisant des méthodes analytiques et des images microscopiques au microscope électronique à balayage (MEB).

Les résultats montrent que les stocks de SiO_2 dans les bambous sont significativement plus faibles que dans la prairie, avec *P. aureosulcata* présentant le stock le plus bas, suivi de *P. nigra* et *P. aurea*. La conversion de la prairie en bambouseraie est identifiée comme la principale cause de cette diminution. La lixiviation et le lessivage des phytolithes pourraient expliquer ces différences. Les images MEB révèlent la présence de phytolithes et de dépôts de Si dans divers tissus, sans montrer de différences notables dans les formes de Si entre les espèces.

Le mémoire suggère plusieurs perspectives pour des recherches futures, notamment la séparation des réservoirs de Si total, et l'évaluation des flux de Si à l'aide de lysimètres pour une meilleure compréhension des dynamiques de Si dans les écosystèmes de bambou.

Mots clés : Belgique, bambou, SiO_2 , stock, *Phyllostachys*, phytolithes, podzol, MEB

Table des matières

List of Figures

List of Tables

1	Introduction	1
1.1	Contextualisation	1
1.2	Cycle global du Si	1
1.3	Si dans le système sol-plante	2
1.3.1	Les réservoirs de Si dans le sol	2
1.3.2	Interaction des réservoirs	3
1.4	Si et plantes	4
1.4.1	Si comme élément bénéfique	4
1.4.2	Si dans les plantes	5
1.5	Bambou	5
1.5.1	Généralités	5
1.5.2	Bambou et Si	6
1.6	Objectifs	6
2	Matériel et méthodes	8
2.1	Site expérimental	8
2.2	Géologie et pédologie	9
2.3	Matériel d'analyse	10
2.3.1	Parties souterraines	10
2.3.2	Parties aériennes	11
2.4	Analyses chimiques et microscopiques	11
2.4.1	Si total	12
2.4.2	Si disponible	13
2.4.3	Analyse microscopique	13
2.5	Évaluation des stocks de SiO ₂	14
2.6	Analyses statistiques	14
2.6.1	Analyses préliminaires	14
2.6.2	Analyses approfondies	15
2.7	Diagramme de la méthodologie	16
3	Résultats	17
3.1	Distribution du SiO ₂ total dans le sol	17
3.1.1	tribution en profondeur de la concentration en SiO ₂	17
3.1.2	Distribution en profondeur du stock de SiO ₂	19
3.1.3	Stock de SiO ₂ total dans les 40 premiers cm	19
3.2	SiO ₂ contenu dans les feuilles	20
3.3	Distribution en profondeur du SiO ₂ disponible	21
3.4	Bilan des stocks de SiO ₂	21
3.5	Analyses par imagerie MEB	23
3.5.1	Sol	23
3.5.2	Feuilles	25
3.5.3	Racines	28
3.5.4	Rameaux	29

3.6	pXRF vs fusion alcaline	32
4	Discussion	34
4.1	Caractéristiques des concentrations de Si dans les feuilles du bambou	34
4.2	Effets du bambou sur la distribution de SiO ₂ dans le sol	35
4.3	Considérations techniques sur la mesure du SiO ₂	37
4.4	Limites de l'étude	37
5	Conclusion et perspectives	39
5.1	Conclusion	39
5.2	Perspectives	39
Annexes		47
A	Stock de SiO ₂ - Sol top 40 cm	47
B	SiO ₂ total dans les feuilles	47
C	SiO ₂ disponible	47
D	Comparaison méthodes	48

List of Figures

1	Cycle global du Si	2
2	Cycle du Si dans le système sol-plante	3
3	Effets bénéfiques du Si sur la croissance des plantes	4
4	Site expérimental	8
5	Description de profil du sol de l'étude	10
6	Fusion alcaline	12
7	pXRF	13
8	Résumé des étapes et analyses principales	16
9	Comparaison graphique entre la prairie et le bambou jaune	17
10	Comparaison graphique entre la prairie et le bambou noir	18
11	Comparaison graphique entre la prairie et le bambou vert	18
12	Stock de SiO ₂ - Sol top 40 cm	20
13	Teneurs en SiO ₂ dans les feuilles	20
14	SiO ₂ disponible	21
15	Bilan des stocks de SiO ₂ total	22
16	Images MEB - Sol	23
17	Images MEB & spectres - Sol	24
18	Images MEB - Feuilles	25
19	Images MEB & spectres - Feuilles	27
20	Images MEB - Racines	28
21	Images MEB & spectres - Racines	28
22	Images MEB - Rameaux	29
23	Images MEB & spectres - Rameaux	31
24	Comparaison pXRF et fusion alcaline - sans effet des réplicats	32
25	Comparaison pXRF et fusion alcaline - avec effet des réplicats	33
26	Comparaison pXRF et fusion alcaline - sans effet des réplicats	48

List of Tables

2	Densités apparentes de la zone d'étude	10
3	Résumé des expériences par éléments.	11
4	Comparaison des concentration en SiO ₂ - Sol	19
5	Stock de SiO ₂ par profondeur	19
6	Bilan des stocks de SiO ₂ total	22
7	coefficients de corrélation et de détermination	32
8	Stock de SiO ₂ - Sol top 40 cm	47
9	SiO ₂ total dans les feuilles	47
10	SiO ₂ disponible	47

Acronymes

FC	Feuilles chaume
FL	Feuilles litière
IC	Intervalle de confiance
MEB	Microscope électronique à balayage
MO	Matière organique
pXRF	Spectromètre à fluorescence des rayons X portable
Si	Silicium
SiO₂	Silice

1 Introduction

1.1 Contextualisation

Depuis la révolution industrielle, la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone (CO_2) et d'autres gaz à effet de serre a considérablement augmenté, entraînant une hausse de la température moyenne mondiale estimée à plus de 1°C entre 1850-1900 et 2010-2020 (Calvin et al., 2023). Cette augmentation découle d'une utilisation non durable de l'énergie, de l'utilisation des terres et des changements d'affectation des terres, des modes de vie et des schémas de consommation et de production (Calvin et al., 2023). Ces activités humaines entraînent une modification des processus terrestres tels que le climat.

Il existe une forte interdépendance entre le climat et la qualité du sol, car il joue un rôle crucial dans la régulation climatique (Lal, 2004). En séquestrant le carbone (C) organique et inorganique, le sol contribue à la fois à l'atténuation et à l'adaptation au réchauffement climatique (Lal et al., 2021). De plus, dans les cycles biogéochimiques, les sols jouent un rôle majeur car ils sont essentiels au fonctionnement de la biosphère terrestre. Comprendre la dynamique des constituants dans un système sol-plante est crucial pour préserver l'environnement de la surface terrestre et assurer la production de biomasse nécessaire aux besoins futurs de l'humanité (Wang et al., 2024).

Le Comité Scientifique des Problèmes de l'Environnement (SCOPE) souligne l'importance du cycle mondial du silicium (Si), qui est fortement lié aux cycles de l'azote, du phosphore et du C (Ittekkot et al., 2012). Le cycle élémentaire du Si a attiré une attention croissante en raison de son impact mondial sur l'environnement (Struyf et al., 2009). Cependant, de nombreuses perturbations du cycle du Si sont observées, notamment via un épuisement de Si dans certains systèmes aquatiques (Humborg et al., 2006), ce qui pourrait entraîner des implications significatives pour les processus environnementaux globaux.

1.2 Cycle global du Si

Le Si est le deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre, représentant 28,8% en poids après l'oxygène (Hans Wedepohl, 1995). Il existe principalement sous forme de silicates, qui constituent 90% de tous les minéraux de la lithosphère (McKenzie and O'Nions, 1983). C'est donc le composant de base de la plupart des sols minéraux, dans lesquels les teneurs en Si peuvent varier entre $<1\%$ et 45% (Sommer et al., 2006).

Le cycle du Si (Figure 1) implique des processus biologiques, chimiques et géologiques à différentes échelles spatiales et temporelles (Struyf et al., 2009). Sur les continents, l'altération physique, chimique et biologique des roches libère du Si sous forme d'acide monosilicique (H_4SiO_4). À travers ce processus, du Si dissous est produit et du CO_2 est consommé, jouant ainsi un rôle clé dans la régulation du climat terrestre à des échelles de temps géologiques (Gaillardet et al., 1999). Ce Si dissous peut être lessivé des écosystèmes terrestres et transféré vers les rivières et les océans (Struyf et al., 2009; Conley and Carey, 2015). Chaque année, environ $9,4 \pm 4,7$ Tmol de Si atteignent les océans, dont 80% proviennent des écosystèmes terrestres sous forme de Si dissous et de Si particulaire (Tréguer and De La Rocha, 2013). La source ultime des flux continentaux de Si vers les océans réside donc dans les processus d'altération des biogéosystèmes terrestres. Les 20% restants proviennent de poussières et de

sources hydrothermales sous-marines (Sommer et al., 2006).

Dans les océans, le Si sert de nutriment essentiel pour les diatomées, un type de phytoplancton microscopique qui utilise le Si pour construire ses frustules cellulaires. Ce transfert de Si des terres vers les océans impacte directement le cycle mondial du C, puisque les diatomées contribuent à environ la moitié de la fixation du C océanique et à environ un cinquième de la photosynthèse terrestre (Tréguer and Pondaven, 2000; Armbrust, 2009). Le Si influence ainsi distinctement le cycle du C à travers i) les processus d'altération et ii) les flux de Si dans les océans (Sommer et al., 2006).

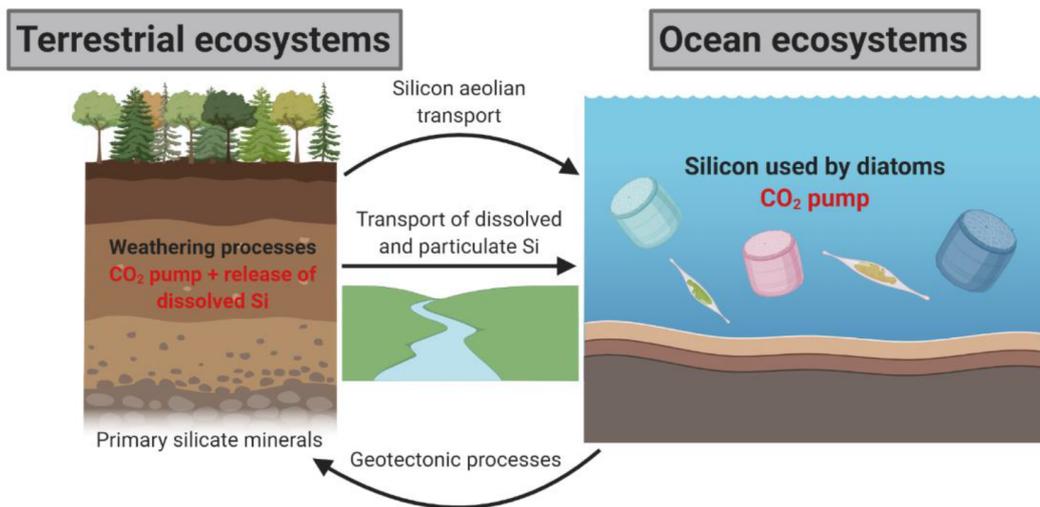


Figure 1: Représentation simplifiée du cycle global du Si. (Source: De Tombeur, 2021)

À l'échelle des temps géologiques, tous les produits de l'altération sont finalement transportés des continents vers les océans (Conley et al., 2006). Bien que l'altération des minéraux soit un des principaux processus de formation des sols, elle ne peut à elle seule expliquer toute la dynamique du Si des biogéosystèmes terrestres. Sur des échelles de temps plus courtes, une partie du Si dissous libéré par l'altération des minéraux est recyclée par la végétation à la surface de la terre (Conley et al., 2006), où les plantes peuvent accélérer l'altération des silicates (Street-Perrott and Barker, 2008). Au cours de la pédogenèse, divers réservoirs se développent, présentant des solubilités et des taux de réaction variés avec les solutions du sol, en raison de leurs différentes surfaces réactives et compositions chimiques/minéralogiques. Par conséquent, les flux entre les écosystèmes terrestres et aquatiques varient selon la proportion relative de ces réservoirs, la cinétique de dissolution du Si de ces différents réservoirs et les flux d'eau (Sommer et al., 2006).

1.3 Si dans le système sol-plante

1.3.1 Les réservoirs de Si dans le sol

Dans le sol, le Si se trouve sous différentes formes dans des réservoirs subdivisés en réservoirs minéralogiques et biogéniques (Sommer et al., 2006). Le pool minéralogique se compose de trois phases : les minéraux primaires hérités du matériau parental, les minéraux secondaires

(phases cristallines) et les phases amorphes (non cristallines) développées lors de la formation du sol (Sommer et al., 2006). Dans la solution du sol, le Si apparaît principalement sous forme d'acide silicique (H_4SiO_4), majoritairement sous forme de monomère (Dove, 1995). Les réserves biogéniques de Si incluent des formes phytogéniques, microbiennes et protozoïques (Struyf et al., 2009). Cependant, la contribution du Si microbien et protozoïque à ces réserves reste principalement qualitative (Clarke, 2003). La majorité des informations disponibles concernent le Si phytogénique, défini comme le Si précipité dans les racines, tiges, branches, feuilles ou aiguilles des plantes (Sommer et al., 2006).

1.3.2 Interaction des réservoirs

La Figure 2 schématise le cycle du Si dans le système sol-plante. Dans le sol, la dissolution des minéraux silicatés primaires est le premier processus mobilisant le Si (De Tombeur, 2021). L'altération chimique libère des solutés dans la solution du sol, qui peuvent se recombinaison pour former des minéraux pédogéniques de la taille de l'argile. Ces minéraux peuvent ensuite se dissoudre à nouveau et contribuer au Si dissous. Les minéraux primaires et secondaires contenant du Si peuvent également être physiquement transférés à l'hydrosphère par lessivage.

Le Si dissous peut être transféré dans l'hydrosphère où il est utilisé par les diatomées ou absorbé par les plantes terrestres. Ces dernières peuvent absorber le Si à partir de la solution du sol de manière passive ou active (Ma et al., 2001). L'accumulation de Si dissous dans les zones de transpiration de la plante entraîne sa précipitation sous forme de silice amorphe hydratée ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) appelées phytolithes (opales) (Piperno, 2002). Après la chute des plantes, ces phytolithes peuvent se dissoudre dans le sol ou être lessivés vers l'hydrosphère. D'autres organismes vivants utilisent également le Si dissous pour produire de la silice amorphe, contribuant ainsi au pool de Si zoogène dans les sols (Puppe, 2020).

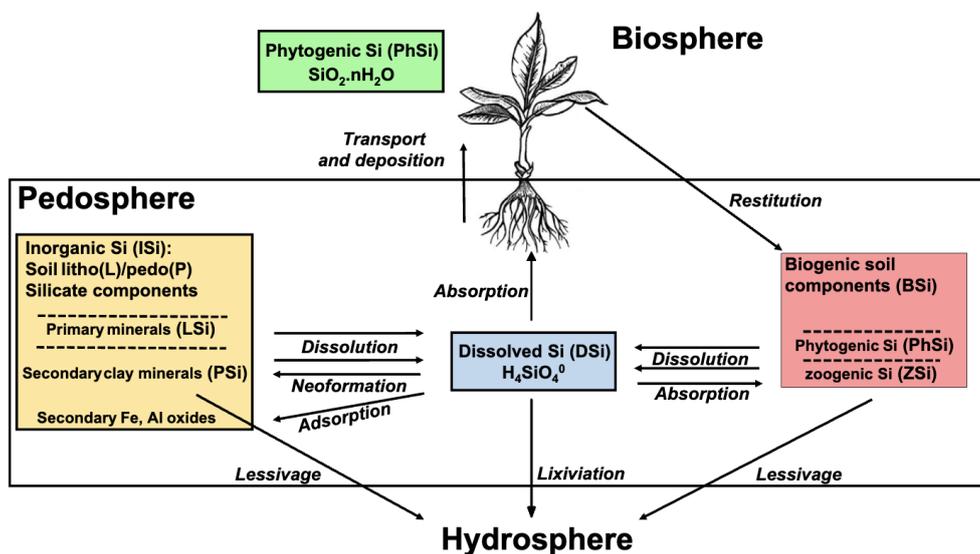


Figure 2: Représentation du cycle du Si dans le système sol-plante (Source: Cornelis and Delvaux, 2016)

Il est clair que la concentration du Si dissous est le résultat d'une combinaison des processus géochimiques via l'altération et de processus biologiques via notamment le retour annuel des phytolithes dans la couche arable constituant un réservoir de silicates hautement réactifs. De nombreuses études biogéochimiques ont montré qu'une part significative du Si dans la solution

du sol provient de la dissolution du pool de Si phytogénique, en raison de sa grande solubilité par rapport aux minéraux cristallins contenant du Si (Fraysse et al., 2006; Gérard et al., 2008; Fraysse et al., 2009).

1.4 Si et plantes

1.4.1 Si comme élément bénéfique

Il a été démontré que le Si joue un rôle important en remplissant diverses fonctions majeures pour les plantes (Figure 3), notamment dans l'atténuation d'une large gamme de stress biotiques et abiotiques (Liang et al., 2007; Cooke and Leishman, 2016; Hartley and DeGabriel, 2016; Coskun et al., 2019). Il peut également participer au renforcement d'organes végétaux (Epstein, 1999) ainsi qu'à l'augmentation des taux de croissance et des rendements des cultures (Tubana et al., 2016). Cependant, les relations entre la silicification (i.e. incorporation de silice (SiO_2) dans les tissus vivants) et la croissance ou la survie des plantes, notamment chez les graminées, restent à clarifier (De Tombeur, 2021).

Malgré ces bénéfices, le Si est encore considéré comme un nutriment non essentiel pour la croissance des plantes (Coskun et al., 2019), car selon les critères Arnon and Stout, 1939, un élément est essentiel si une plante ne peut pas achever son cycle de vie en son absence. Jusqu'à présent, il n'a pas été démontré que les plantes sont incapables d'achever leur cycle de vie sans Si, bien que leur croissance et leur rendement soient significativement réduits en cas de carence en Si (Ma and Takahashi, 2002a).

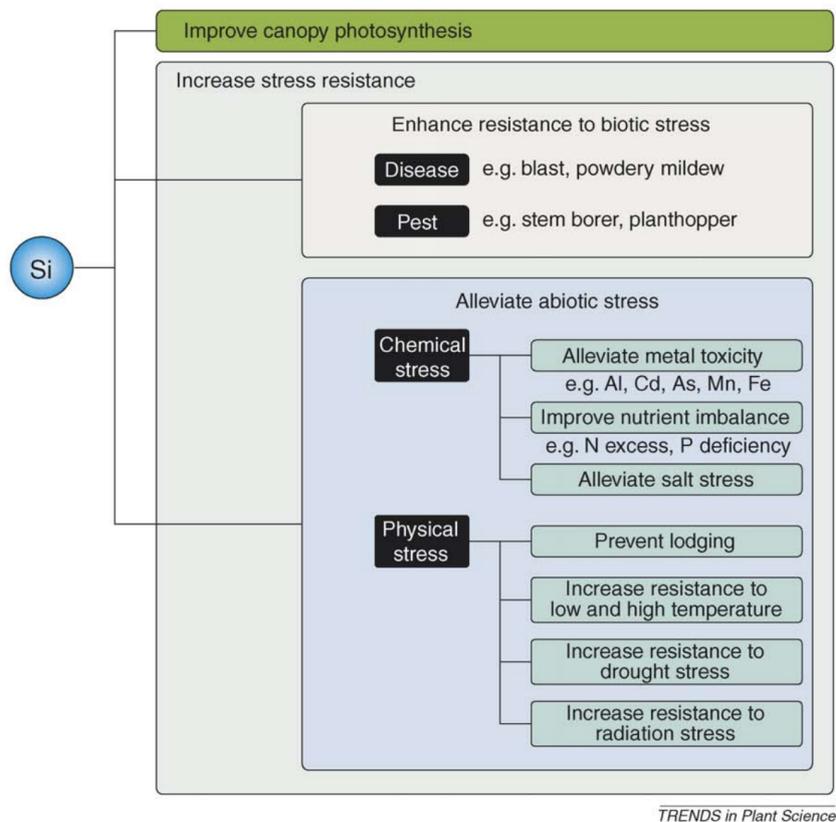


Figure 3: Effets bénéfiques du Si sur la croissance des plantes en relation avec les stress biotiques et abiotiques (Source: Ma and Yamaji, 2006)

1.4.2 Si dans les plantes

Bien que l'importance du Si dans l'écologie des plantes reste subtil (De Tombeur et al., 2023), toutes les plantes cultivées en contiennent avec des concentrations allant de 0,1% à 16% de la matière sèche (Sommer et al., 2006). Ces niveaux peuvent dépasser ceux de certains macronutriments (Epstein, 1994). Cette variation entre les espèces s'explique par des différences dans l'expression et la fonctionnalité des transporteurs de Si (Deshmukh et al., 2020). L'accumulation de Si dans les plantes dépend également de facteurs extrinsèques tels que la composition minéralogique du sol (Henriet et al., 2008a;Henriet et al., 2008b), la cinétique de dissolution des diverses phases solides contenant du Si dans les sols (Sommer et al., 2006), le taux de transpiration, et la disponibilité de H_4SiO_4 dans la solution du sol (Hodson and Sangster, 1999).

Les plantes supérieures ont été divisées en trois groupes en fonction de leur teneur en Si. Les plantes ayant une teneur en Si $<0,5\%$ et un rapport Si/Ca $<0,5$ sont définies comme des plantes non accumulatrices. Les plantes dites accumulatrices sont celles à haute teneur en Si ($>1,0\%$) et avec des rapports Si/Ca élevés ($>1,0$) avec une absorption active. Celles dont la teneur en Si et le rapport Si/Ca sont situés entre ces deux catégories sont considérées de type intermédiaire (Ma and Takahashi, 2002b). Les graminées sont connues comme accumulatrices de Si (De Bakker et al., 1999). Les plantes qui accumulatrices fournissent davantage de Si aux sols pendant leur décomposition (Sommer et al., 2006). Les types de végétation dominés par les graminées, comme le bambou, sont donc considérés comme ayant de grands réservoirs de Si amorphe biogénique dans les couches supérieures du sol (Struyf et al., 2009).

1.5 Bambou

1.5.1 Généralités

Les bambous appartiennent à la sous-famille des Bambusoideae au sein des graminées (Poaceae) et se sont adaptés et diversifiés dans les habitats forestiers (Lewis et al., 2012). Ils forment une lignée distincte, soutenue par des données moléculaires et des caractéristiques spécifiques des feuilles (Kelchner, 2013) et comprennent environ 1 482 espèces, réparties en trois tribus : Arundinarieae (bambous ligneux tempérés), Bambuseae (bambous ligneux tropicaux) et Olyreae (bambous herbacés) (Lewis et al., 2012).

Ils sont largement distribués dans les domaines climatiques tropicaux, subtropicaux et tempérés, avec une répartition latitudinale allant de c. $47^{\circ}S$ à $50^{\circ}N$ et une répartition altitudinale du niveau de la mer jusqu'à 4 300 m (Liese and Köhl, 2015). Ils occupent donc une large gamme d'habitats, notamment les forêts, et sont souvent des éléments dominants ou très visibles de la végétation, que ce soit dans les zones climatiques tempérées ou tropicales (Liese and Köhl, 2015). La ressource totale en bambou est estimée à 35 millions d'hectares, dont 24,9 millions d'hectares (71% de la superficie totale en bambou) se trouvent en Asie. La superficie totale de bambou a augmenté de près de 50% entre 1990 et 2020, principalement en raison des augmentations en Chine et en Inde (*Global Forest Resources Assessment 2020*, 2020). En plus d'être culturellement et historiquement important (Dlamini et al., 2021), le bambou est donc un produit forestier non ligneux remarquable, représentant de nombreux potentiels économiques (Gupta and Kumar, 2008), largement utilisé dans plusieurs secteurs d'activité allant de l'industrie de construction à la médecine (Ding et al., 2008a).

Le bambou offre de multiples avantages. Premièrement, sa culture est considérée comme une culture à faible impact car il peut être cultivé sans pesticides ni engrais, réduisant ainsi la dégradation des sols et la pollution de l'eau, ce qui en fait une alternative écologiquement durable par rapport aux cultures conventionnelles (Rathour et al., 2022). De plus, le bambou se distingue comme l'une des plantes à maturation la plus rapide avec un taux de croissance élevé, une importante capacité de repousse annuelle après la récolte ainsi qu'une importante biomasse ce qui font de lui une ressource hautement renouvelable (Liese and Köhl, 2015). L'utilisation du bambou comme matériau durable a gagné en popularité ces dernières années, notamment dans le contexte de l'architecture moderne (Nguyen et al., 2018). Le bambou se présente comme une alternative attrayante pour résoudre des défis environnementaux critiques tout en soutenant le progrès culturel et économique (Gupta and Kumar, 2008).

Les bambous ne sont pas endémiques en Europe (Potters et al., 2009;Liese and Köhl, 2015). Bien qu'on ne connaisse encore peu de choses sur leur croissance en Europe occidentale, ils sont cultivés intensivement depuis 150 ans (Potters et al., 2009), certaines espèces convenant aux climats tempérés (Potters et al., 2009;Liese and Köhl, 2015). De plus en plus de recherches sont mises en place (notamment en Belgique par Gielis et al., 2005) pour pallier le manque d'informations et afin d'étudier ses potentiels notamment en termes de bioénergie ou encore de décontamination par phytoremédiation (Potters et al., 2009).

1.5.2 Bambou et Si

Le rôle du Si dans les bambous a fait l'objet de peu d'études comparé à d'autres Poaceae comme le blé ou le riz dont les nombreux effets bénéfiques ont été démontrés (Epstein, 2001;Gong et al., 2003). Des expériences d'application d'engrais de silicates sur des bosquet de bambous ont montré une augmentation de la biomasse des feuilles, du nombre de bourgeons et de la rigidité des chaumes (Ma and Takahashi, 2002b). Ces recherches ont montré que la teneur en SiO_2 des sols influence positivement la concentration de SiO_2 dans les feuilles et le développement. Il a été observé que les bamboueraies à forte productivité poussent sur des sols davantage riches en SiO_2 biodisponible et présentent des niveaux élevés de Si dans les feuilles.

Les bambous font partie des plantes qui accumulent le plus de Si (Motomura et al., 2002). Cependant, le nombre de publications présentant des teneurs de Si dans les bambous reste faible. De plus, quelques questions restent débattues quant aux différentes teneurs accumulées dans les organes. À titre d'exemple, Ding et al., 2008b et Lux et al., 2003, soutenant que les feuilles ont des teneurs plus élevées en Si que les racines, mesurent respectivement des teneurs dans les feuilles de 9,04% (en moyenne) et 7,6% pour un *Phyllostachys heterocycle* du Japon. À l'inverse, Li et al., 2006 ont mesuré des teneurs de 3,1% dans les feuilles d'un bambou moso (*Phyllosctachys pubescens*) en Chine, soutenant que les racines (7,32%) possèdent davantage de Si que les feuilles. Le groupe *Phyllosctachys sp.* regroupe la majorité des variétés cultivées en Europe (Liese and Köhl, 2015). De plus, il a récemment attiré l'attention de scientifiques qui ont étudié le stockage de SOC dans une plantation de bambou en climat tempéré (Kovacs et al., 2024).

1.6 Objectifs

Les études scientifiques sur le stockage du Si dans le bambou ainsi que son cycle ont pris de l'importance ces dernières années. Cependant, il existe encore peu de connaissances sur les teneurs et les formes de Si au sein des espèces. En outre, il existe encore peu de données en

climat tempéré. De plus, aucune étude ne présente une comparaison entre la transition d'une prairie vers une plantation de bambou.

Le présent travail vise donc à :

1. Comparer le stock de Si entre une prairie et trois espèces de bambou plantées sur le même terrain il y a 14 ans. L'étude se fera à travers le stock de SiO_2 dans le sol et dans la biomasse.
2. Caractériser les formes de Si dans différents organes des trois espèces de bambou, via des images microscopiques.

2 Matériel et méthodes

2.1 Site expérimental

L'étude a été menée dans le jardin botanique De Kleine Boerderij (51°35'N, 4°83'E) dans la commune de Merksplas, située en province d'Anvers en Belgique. Le site d'étude comprend une prairie permanente dont une partie a été convertie en bamboueraie en 2010 (Figure 4). Les bambous sont entretenus de manière régulière (i.e. élagage par le bas, gestion de la densité des tiges, etc.) mais aucun traitement chimique n'est appliqué. Le site présente un climat de type Cfb selon la classification climatique de Köppen-Geiger. Ce type de climat est défini comme étant tempéré (C) avec des précipitations uniformes toute l'année (f) ainsi que des étés frais (b). Selon l'Institut Royal Météorologique Belge (IRM), pour la période 1991-2020, la température moyenne journalière est de 10,8°C et la quantité de précipitation moyenne annuelle est de 895,5 mm.

La bamboueraie a été plantée il y a 14 ans sur la prairie et les sols n'ont pas subi de changement d'occupation de sol (i.e. prairie) entre 1979 et 2010 (information vérifiée sur Geopunt). Pour ces raisons, il apparaît pertinent d'étudier l'impact de la végétation sur la dynamique du Si. Les trois espèces faisant l'objet de cette étude sont le bambou noir (*Phyllostachys nigra*), le bambou vert (*Phyllostachys aurea*) et le bambou jaune (*Phyllostachys aureosulcata*), la prairie faisant office de témoin. Ces parcelles ont été sélectionnées pour leur facilité d'accès et la présence d'espèces clairement identifiables. Enfin, notons que ces trois espèces ont déjà été étudiées dans le cadre de deux travaux de fin d'études portant sur le carbone présent dans leurs parties aériennes et souterraines.

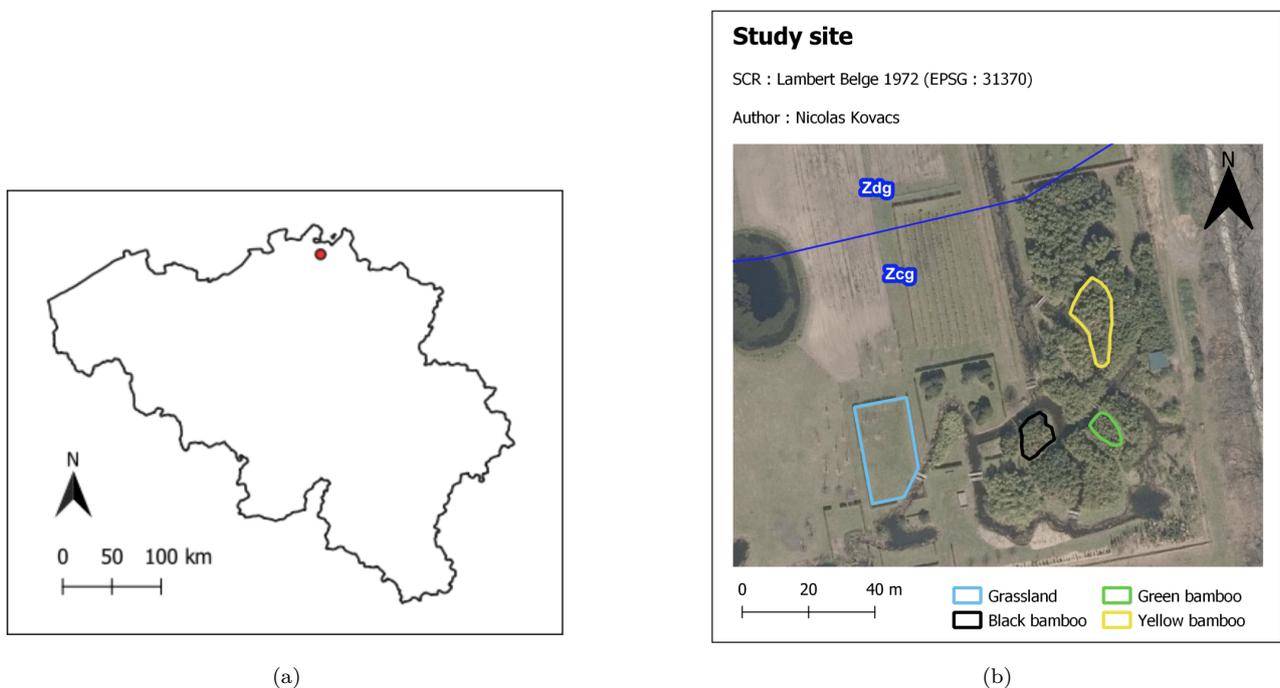


Figure 4: Cartes indiquant a) la localisation du site d'étude et b) la description du site d'étude comprenant les trois espèces de bambous et la prairie (Kovacs, 2022)

La Table 1 présente les caractéristiques des quatre parcelles de l'étude, i.e. a densité de chaume

(STD pour Standing Culm Density, en chaume/ m^2), le diamètre à hauteur de poitrine (DBH pour Diameter at Breast Height, en cm) ainsi que la surface basale de chaume (Culm Basal Area, en%) soit l'occupation au sol. *P. nigra* et *P. aurea* ont un DBH similaire, et leur surface basale de chaume est respectivement de 0,42% et 0,35%. *P. aureosulcata* présente moins de chaumes par mètre carré que les deux parcelles précédentes, mais possède un DBH moyen deux fois plus élevé avec une surface basale de chaume de 1,07%.

	Prairie	<i>P.nigra</i>	<i>P.aurea</i>	<i>P.aureosulcata</i>
STD (chaumes m^{-2})	/	19	15	9
DHB (cm)	/	1.57 ± 0.58^b	1.64 ± 0.54^b	3.69 ± 1.06^a
Culm basal area (%)	/	0.42	0.35	1.07

Table 1: Caractéristiques de la prairie, *P. nigra*, *P. aurea* et *P. aureosulcata*. Les valeurs de DBH sont données avec l'écart-type, les différentes lettres indiquent une différence significative à $p < 0.05$, adapté de Kovacs et al., 2024.

2.2 Géologie et pédologie

D'un point de vue géologique, la couche superficielle de cette région est majoritairement composée de sable déposé par le vent au cours de la dernière période glaciaire. Ces sables éoliens sont le résultat de la « Formation de Gand » datant du Pléistocène supérieur (dernier étage du Pléistocène, précédant l'Holocène).

D'un point de vue pédologique, il s'agit d'un sol de type Zcg3, défini comme un sol sableux modérément sec avec un horizon B clairement défini en fer et/ou en humus (cartographié jusqu'à une profondeur de 1,25 m), selon la base de données des sous-sols de Flandre. La Figure 5 montre une carotte de sol prélevée sur le site de la prairie. L'étude pédologique visuelle permet d'identifier un horizon spodique humifère Bh (entre c. 30 et 50 cm environ) selon la méthode de la Base de Référence Mondiale pour les Ressources en Sol (WRB). Cet horizon est effectivement enrichi en matière organique (MO), souvent dérivée des horizons supérieurs du sol, comme les horizons O ou A, et transportée vers l'horizon Bh par le processus de lessivage. La MO donne généralement à l'horizon Bh une couleur sombre, ce qui est l'une des indications visuelles de la présence de cet horizon. La présence de cet horizon caractéristique confirme qu'il s'agit d'un podzol.

Le développement de profil des podzols implique que les composés d'aluminium (Al), de fer (Fe) et organiques migrent de la surface vers le bas avec les eaux de percolation provenant des précipitations. Ils précipitent ensuite dans un horizon illuvial spodique. L'horizon éluvial sus-jacent est blanchi et souvent constitué de matériau albique dans de nombreux podzols. Cet horizon éluvial (E) est généralement surmonté d'un horizon minéral mince à teneur plus élevée en matière organique, lui-même recouvert d'une couche organique, surtout dans les régions boréales et tempérées. De plus, le matériau parental des podzols comprend des matériaux d'altération de roches siliceuses, tels que les moraines glaciaires, ainsi que les dépôts alluviaux et éoliens de sables quartzeux (WRB, 2014).

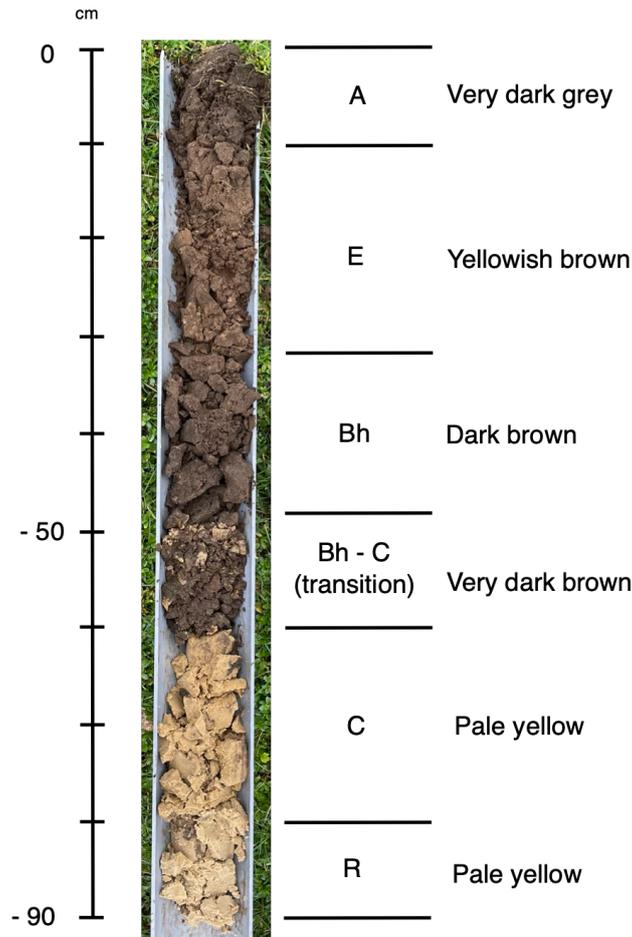


Figure 5: Description du profil de sol de la prairie. *Les couleurs sont uniquement basées sur une interprétation visuelle personnelle.* (Source : photographie personnelle)

Concernant la densité apparente du sol (g/cm^3), celle-ci est la plus élevée pour la prairie et la plus basse pour *P. aureosulcata* (Table 2). De manière générale, la densité apparente des trois parcelles de bambou augmente avec la profondeur.

Densité apparente (g cm^{-3})	Prairie	<i>P. nigra</i>	<i>P. aurea</i>	<i>P. aureosulcata</i>
0 - 10 cm	1.30 ± 0.03^a	0.78 ± 0.12^b	0.74 ± 0.04^b	0.32 ± 0.06^c
10 - 20 cm	2.00 ± 0.11^a	1.39 ± 0.15^b	1.25 ± 0.13^b	0.99 ± 0.11^c
20 - 30 cm	1.90 ± 0.01^a	1.61 ± 0.11^b	1.76 ± 0.28^{ab}	1.00 ± 0.36^c
30 - 40 cm	1.84 ± 0.07^b	1.91 ± 0.05^{ab}	1.96 ± 0.07^a	1.66 ± 0.05^c

Table 2: Densités apparentes de la zone d'étude en g cm^{-3} . Les différentes lettres indiquent une différence significative à $p < 0.05$, adapté de Kovacs et al., 2024.

2.3 Matériel d'analyse

2.3.1 Parties souterraines

Les sols des quatre parcelles ont été carottés à l'aide d'une tarière manuelle jusqu'à une profondeur de 40 cm. Cette valeur a été choisie en concordance avec la fin du développement

racinaire au-delà de cette profondeur. Trois répétitions ont été effectuées de manière aléatoire pour chaque parcelle afin d’assurer la représentativité des échantillons. Un bulletin analytique a été réalisé pour chaque parcelle à l’aide d’une tarière. Chaque carotte de sol a ensuite été subdivisée en quatre sous-échantillons correspondant aux intervalles de profondeur suivants : 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, et 30-40 cm. Au total, 4 profondeurs x 3 carottes x 4 parcelles = 48 échantillons ont été prélevés. Chaque couche de 10 cm a ensuite été séchée à 40°C. Les racines des bambous ont été séparées du sol et séchées également.

2.3.2 Parties aériennes

Les feuilles, les rameaux et les chaumes ont été prélevés sur deux bambous de chaque espèce. Les feuilles prélevées sur les chaumes (FC) ont été séparées en 2 sous-groupes : les feuilles du haut de la chaume et les feuilles du milieu de la chaume. Les feuilles du bas n’ont pas été sélectionnées car elles sont régulièrement coupées (voir point 2.1 du matériel et méthode). Au total, 2 chaumes x 2 sous-groupes x 3 espèces = 12 échantillons ont été prélevés. L’ensemble de la biomasse prélevée a été séchée à 80°C. Un carré de 50 cm a été construit pour collecter les feuilles de litière (FL). Trois sacs de feuilles ont été récoltés par parcelle de bambou pour un total de 3 collecteurs x 3 parcelles = 9 échantillons.

2.4 Analyses chimiques et microscopiques

L’ensemble des expériences a été réalisé au laboratoire de géo-pédologie de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech et au laboratoire de recherche Greenmat de l’ULiège.

Deux approches ont été employées: i) une approche quantitative comprenant des mesures de Si total et de Si biodisponible et ii) une approche qualitative incluant une analyse au microscope à balayage électronique (MEB). Le but de cette combinaison d’approches était de fournir une compréhension plus complète des propriétés et de la distribution du Si dans les sols et végétaux étudiés. Le tableau x reprend un résumé des expériences réalisées par éléments. Le résumé des expériences effectuées est présenté à la Table 3.

	Analyses quantitative			Analyse qualitative	
	Si _{tot} fusion alcaline	Si _{tot} pXRF	Si _{dispo} CaCl ₂	MEB	
Sol	x	x	x	x	
FC	x			x	
FL	x			x	
Racines				x	
Rameaux				x	

Table 3: Résumé des expériences par éléments.

Note : Après séchage à l’étuve, les échantillons végétaux ont été broyés au broyeur à couteaux (GRINDOMIX GM 200 Retsch) pour obtenir de la poudre. Les échantillons de sol ont été broyés (PULVERISETTE 7 Fritsch) et tamisés à 200 microns. Pour l’analyse microscopique, les échantillons n’ont pas été broyés.

2.4.1 Si total

Deux méthodes d'analyse différentes ont été utilisées pour quantifier les teneurs totales en Si : la fusion alcaline et la spectrométrie à fluorescence X. Ces deux techniques ont été étudiées pour tester leur interchangeabilité, dans le but de déterminer si l'une des deux, étant moins coûteuse en termes de temps et d'argent, pouvait être utilisée pour mesurer la teneur en Si des végétaux.

Si total par fusion alcaline

Les manipulations de fusion alcaline ont été menées selon un protocole adapté de Chao et Sanzolo (1992) et Henriot et al. (2008). Cette technique consiste à dissoudre toutes les formes de Si présentes, les convertissant en une forme soluble. Cette méthode assure la quantification précise du Si total car elle permet de décomposer des matrices complexes.

Chaque échantillon de sol a été traité afin de pouvoir étudier i) la variabilité des teneurs en SiO_2 en fonction de la profondeur selon les 4 types de végétaux ii) les stocks de SiO_2 dans les différents sols, en comparaison avec le témoin. L'ensemble du Si retrouvé dans les végétaux est présent sous forme de phytolithes. Les feuilles (FC et FL) de chaque espèce de bambou ont été étudiées afin de i) comparer les teneurs en phytolithes en fonction de l'espèce végétale et ii) mesurer la quantité de SiO_2 retournant au sol via la chute des feuilles.

La première étape consiste en une perte au feu. 5 g d'échantillons broyés ont été placés dans des creusets de porcelaine à 450°C au four pour une durée de 24 heures. Les échantillons, une fois refroidis, ont ensuite été pesés afin de connaître la teneur en cendres.

La deuxième étape repose sur la fusion alcaline. 1,6 g de métaborate de lithium (BLiO_2) et 0,4 g de tétraborate de lithium ($\text{B}_4\text{Li}_2\text{O}_7$) ont été ajoutés aux échantillons de sol placés dans des creusets en graphite. Les creusets ont été placés au four préalablement porté à 1000°C . Le four stabilisé à cette température, les échantillons y ont été laissés pour 5 min de fusion. Les pellets de chaque creuset (Figure 6), passant du rouge au gris métallique, ont été ajoutés dans 100 ml d'acide nitrique (HNO_3) 10% (eau Milli-Q) sur une plaque agitatrice chauffée entre 100 et 150°C jusqu'à dissolution complète. Les sols et les végétaux ont été dilués respectivement 100 et 10 fois, puis la teneur en Si a été déterminée par spectrométrie d'émission atomique à plasma inductif (ICP-OES 5110 Agilent).



Figure 6: Pellets de sol après passage au four (Source: photographie personnelle)

Si total par fluorescence à rayon X

La fluorescence X est une technique analytique utilisée pour déterminer la composition élémentaire des matériaux. Dans cette étude, l'instrument utilisé a été un spectromètre portable (pXRF, S1 TITAN Bruker). Il fonctionne en émettant des rayons X qui excitent les atomes de l'échantillon, provoquant l'émission de rayons X caractéristiques de chaque élément présent. Ces émissions sont ensuite détectées et analysées pour déterminer les concentrations élémentaires, y compris celle du silicium. Le pXRF est particulièrement avantageux car il offre une analyse rapide (i.e. quelques minutes).

Les échantillons de sol ont été disposés dans des capsules et scannés au pXRF (Figure 7).



Figure 7: pXRF (Source : photographie personnelle)

2.4.2 Si disponible

Si disponible par extraction au CaCl_2

Les manipulations d'extraction au de chlorure de calcium (CaCl_2) ont été réalisées selon le protocole de Nonaka et Takahashi (1988, 1990). Cette technique consiste à extraire le Si directement assimilable par les plantes. Elle quantifie le Si présent dans la phase soluble du sol.

2 g d'échantillon de sol ont été ajoutés à 20 ml de CaCl_2 0,01 M puis agités durant 16 h avant d'être placés à la centrifugeuse à 2000 tours/minute pour 10 min puis filtrés afin de séparer le surnageant des résidus solides. L'ensemble des échantillons a été passé à l'ICP-OES.

2.4.3 Analyse microscopique

La distribution, la structure physique et la composition chimique des organes végétaux et du sol de chaque bambou ont été observées et comparées via un microscope à balayage électronique (TESCAN CLARA Bruker). Les analyses MEB ont été effectuées à une distance de travail de

10 mm à une tension d'accélération de 15 keV. Pour chaque bambou, un échantillon de chaque organe (FC, FL, racines, chaume, rameaux) a été étudié. Le sol des 4 parcelles a également été observé. Chaque échantillon a été placé et fixé sur une plaque d'aluminium et recouvert d'une fine couche de carbone à l'aide d'un pulvérisateur (Sputter Coater SPI).

L'ensemble des échantillons a été observé suivant le même protocole au cours de 4 séances pour une durée totale de 15 heures. Les observations ont été réalisées à l'aide d'une lentille de détection d'électrons secondaires et d'une lentille 4Q BSE-compo. Chaque élément a été étudié en termes de structure, d'emplacement et d'analyse chimique qualitative sur un point ciblé. Seuls les éléments présentant des teneurs en Si ont fait l'objet d'une étude plus approfondie.

2.5 Évaluation des stocks de SiO₂

Un des objectifs étant de quantifier le stockage du Si dans le sol, la transition du contenu en stock était nécessaire. Il était donc nécessaire de prendre en compte la densité apparente du sol. Le stock de SiO₂ a été mesuré via la formule suivante :

$$\text{SiO}_2 m = \rho_s \times \frac{\text{SiO}_2}{1000} \times d \quad (1)$$

Où SiO₂m représente le stock de SiO₂ du sol par unité de surface [kgSiO₂ m⁻²], ρ_s est la densité apparente moyenne du sol [kg m⁻³] (n = 3 pour chaque profondeur), SiO₂ est la teneur de SiO₂ du sol mesurée par les méthodes analytiques [gSiO₂ kg⁻¹] et d est la profondeur d'échantillonnage du sol (= 0,1 m). Ensuite, le stock de SiO₂ des 40 premiers cm a été calculé en additionnant le stock de SiO₂ de chaque couche.

Les stocks de SiO₂ dans chaque organe de bambou par unité de surface ont été déterminés en multipliant la concentration de Si dans chaque organe par la biomasse correspondante. Les concentrations des racines et des chaumes ont été empruntées d'une étude sur des *P. pubescens* au Japon (Umemura and Takenaka, 2014) et ont été supposées identiques pour les trois espèces étudiées. La biomasse des chaumes a été approximée par la biomasse aérienne obtenue pour les trois espèces dans un autre étude (Bernard, 2023).

2.6 Analyses statistiques

Une distribution normale des valeurs de teneur en Si ou SiO₂ a été supposée, le nombre de répétitions étant trop faible (n = 3) pour vérifier la normalité. L'ensemble des analyses statistiques ainsi que les graphes ont été réalisés à l'aide du logiciel RStudio 2023.06.2.

2.6.1 Analyses préliminaires

Afin de déterminer si les deux méthodes d'analyses de Si total étaient interchangeable, une évaluation de la relation entre les résultats obtenus via les deux méthodes a été réalisée à travers i) un test de corrélation permettant de quantifier la force et la direction de la relation linéaire entre les deux méthodes et ii) une régression linéaire permettant de modéliser la relation entre deux variables (ici, les résultats des deux méthodes). Ainsi, il a été possible d'évaluer la similarité des deux méthodes, de quantifier leur relation linéaire et d'identifier leur proportion de variance.

Afin d’approfondir la comparaison, un test de Student apparié a été réalisé pour chaque profondeur avec comme hypothèse nulle qu’il n’y a pas de différence significative entre les moyennes des résultats des deux méthodes. Ce test est particulièrement adapté ici car les mesures obtenues par les deux méthodes proviennent des mêmes échantillons, créant ainsi des paires appariées. Cette étape est déterminante, ses résultats impactant certains choix lors de la suite de ce travail.

2.6.2 Analyses approfondies

Tout d’abord, un premier examen a été réalisé pour mieux comprendre le système. L’objectif de ce dernier était d’analyser visuellement les profils de sol en termes de teneur en SiO_2 (mg g^{-1}).

L’analyse statistique de cet examen a été réalisée en comparant chaque profondeur de la prairie, de 0-10 cm à 30-40 cm, avec les trois espèces de bambou comme suit. Chaque profondeur de parcelle contient trois répliques ($n = 3$). Les profondeurs de deux parcelles distinctes (par exemple, prairie vs bambou noir) ont été comparées individuellement en calculant l’erreur standard (SE), qui est le rapport entre l’écart-type (STD) et la racine carrée du nombre d’échantillons. L’écart-type indique l’incertitude de la mesure, tandis que l’erreur standard reflète l’incertitude du modèle utilisé, dans ce cas, la moyenne du Si total [%] ($n = 3$).

Ensuite, un intervalle de confiance (IC) par profondeur a été calculé en utilisant l’erreur standard, avec un niveau de confiance de 95%. Enfin, une double comparaison a été effectuée. Pour une même profondeur, si la moyenne (\bar{y}_1) de la première parcelle (par exemple, prairie 010 cm) se situe en dehors de l’intervalle de confiance de la deuxième parcelle (par exemple, bambou noir 010 cm) (IC2), et si la moyenne (\bar{y}_2) de la deuxième parcelle se situe en dehors de l’intervalle de confiance de la première parcelle (IC1), alors les deux moyennes sont significativement différentes. Si au moins une moyenne se situe dans l’intervalle de confiance de l’autre, les deux moyennes ne sont pas significativement différentes.

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

$$\text{SE} = \frac{\text{STD}}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

$$\text{CI} = [\bar{y} - 1.96 \times \text{SE}, \bar{y} + 1.96 \times \text{SE}] \quad (4)$$

Finalement, pour les teneurs et stocks de SiO_2 ($n = 3$ par type de végétation), une analyse de variance (ANOVA) a été utilisée pour tester l’effet du type de végétation sur les teneurs et stocks de SiO_2 total et disponible. En fonction des résultats des tests précédents, un test post-hoc de Tukey HSD (différence significative élevée) a été réalisé pour identifier les différences significatives entre les quatre parcelles.

2.7 Diagramme de la méthodologie

La Figure 8 résume les principales analyses statistiques effectuées dans ce travail ainsi que le plan d'échantillonnage.

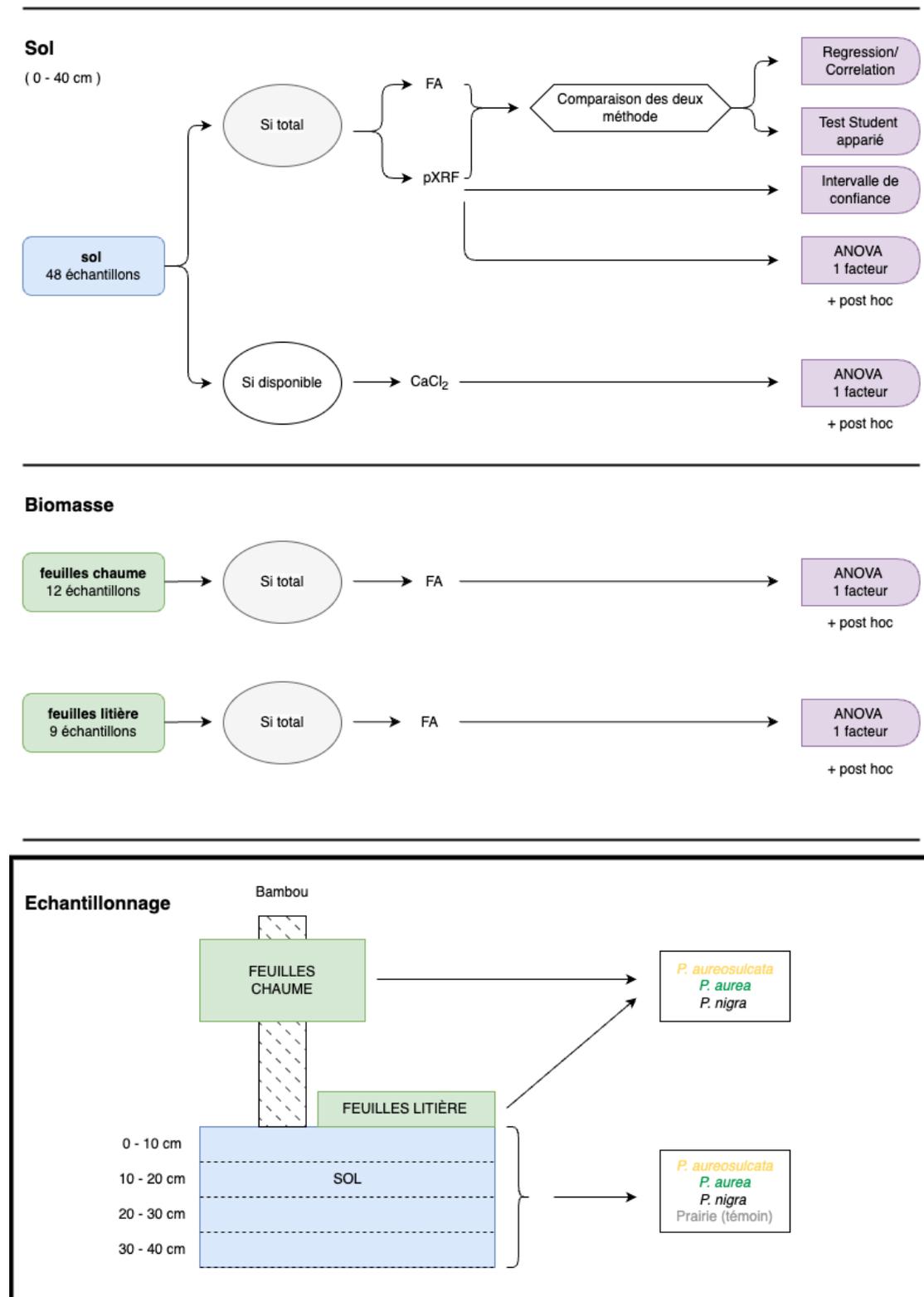


Figure 8: Résumé des étapes et analyses principales

3 Résultats

3.1 Distribution du SiO₂ total dans le sol

3.1.1 Distribution en profondeur de la concentration en SiO₂

Les Figures 9, 10 et 11 montrent l'évolution de la distribution verticale de la silice [mgSiO₂ g⁻¹] entre la surface et une profondeur de 40 cm pour *P. aureosulcata*, *P. nigra* et *P. aurea* respectivement.

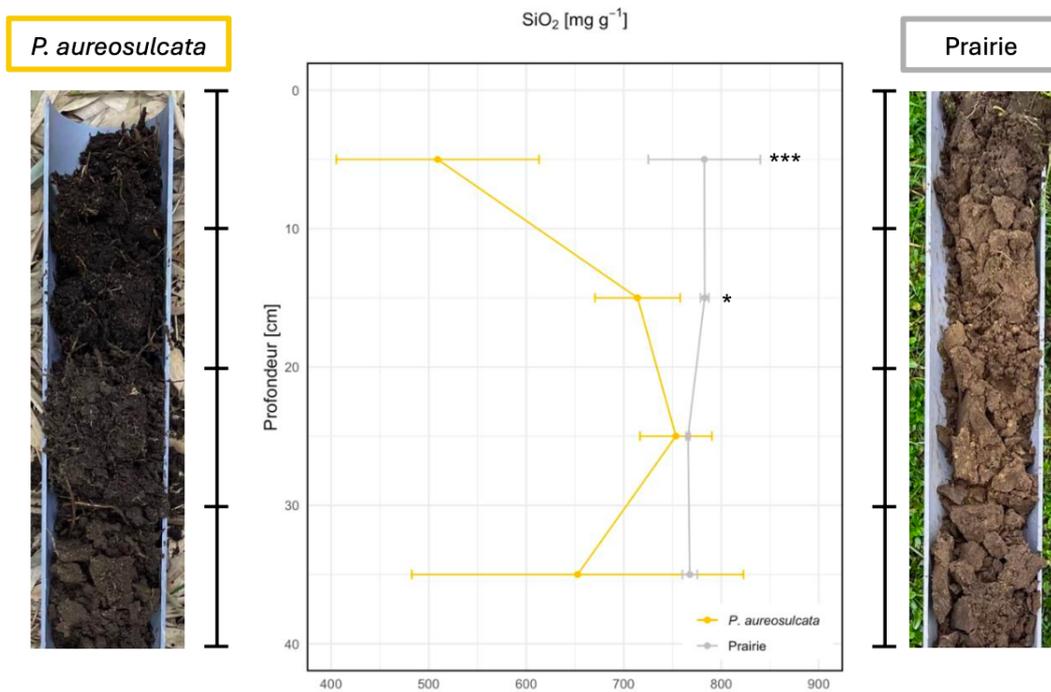


Figure 9: Comparaison des distributions verticales du SiO₂ [mgSiO₂ g⁻¹] (moyenne ± écart type, n = 3) entre la prairie et le bambou jaune (*P. aureosulcata*). Les teneurs ont été obtenues par pXRF. Code (en supposant une distribution normale) : Pas de symbole p > 0,1, • p < 0,1 (niveau de confiance de 90%), * p < 0,05 (niveau de confiance de 95%), ** p < 0,01 (niveau de confiance de 99%), *** p < 0,001.

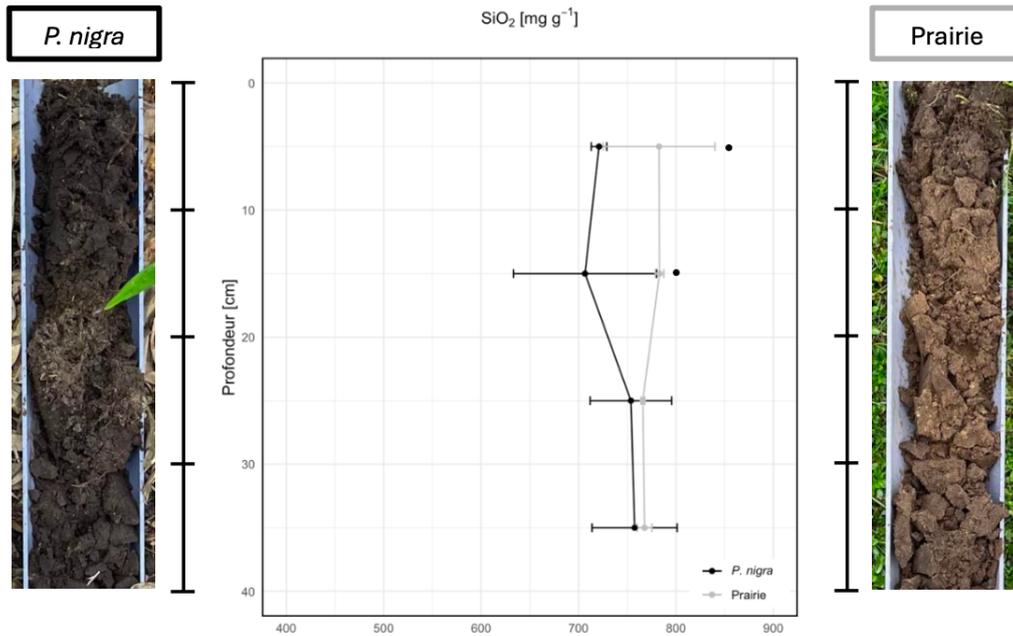


Figure 10: Comparaison des distributions verticales du SiO₂ [mgSiO₂ g⁻¹] (moyenne ± écart type, n = 3) entre la prairie et le bambou noir (*P. nigra*). Les teneurs ont été obtenues par pXRF. Code (en supposant une distribution normale) : Pas de symbole p > 0,1, • p < 0,1 (niveau de confiance de 90%), * p < 0,05 (niveau de confiance de 95%), ** p < 0,01 (niveau de confiance de 99%), *** p < 0,001.

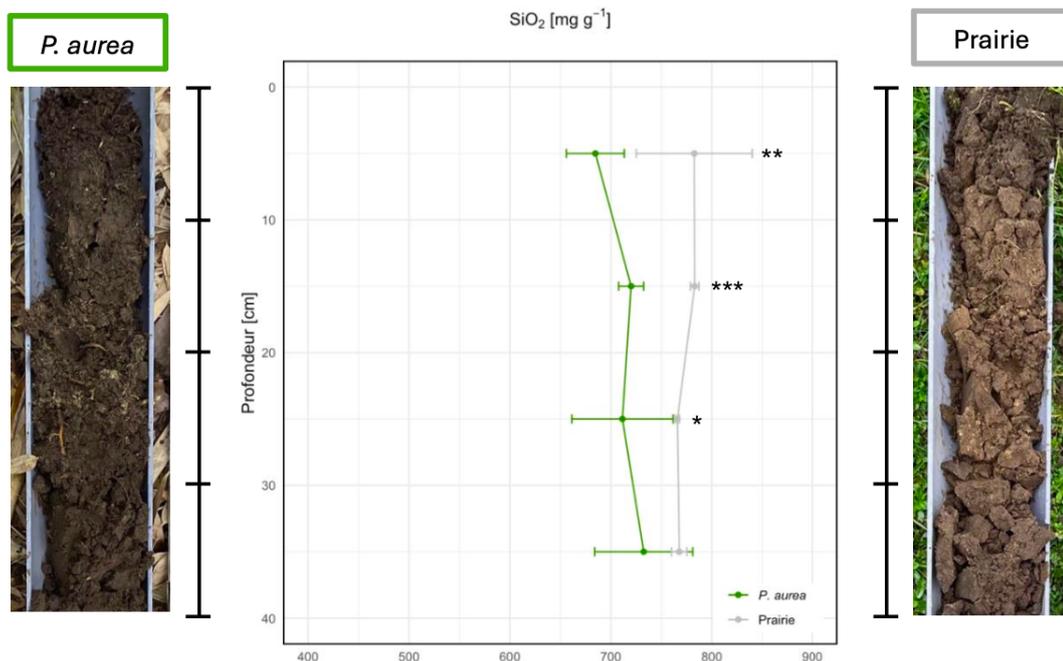


Figure 11: Comparaison des distributions verticales du SiO₂ [mgSiO₂ g⁻¹] (moyenne ± écart type, n = 3) entre la prairie et le bambou vert (*P. aurea*). Les teneurs ont été obtenues par pXRF. Code (en supposant une distribution normale) : Pas de symbole p > 0,1, • p < 0,1 (niveau de confiance de 90%), * p < 0,05 (niveau de confiance de 95%), ** p < 0,01 (niveau de confiance de 99%), *** p < 0,001.

La Table 4 reprend les valeurs de concentrations en SiO₂ total à chaque profondeur pour chaque espèce de bambou ainsi que la prairie.

	mgSiO ₂ g ⁻¹			
	Prairie	<i>P. nigra</i>	<i>P. aureosulcata</i>	<i>P. aurea</i>
0 - 10 cm	782.6 ± 57.4 ^a	721.0 ± 8.0 ^{ab}	509.1 ± 104.0 ^b	684.6 ± 28.7 ^{ab}
10 - 20 cm	783.0 ± 4.3 ^a	706.6 ± 73.4 ^a	714.1 ± 43.7 ^a	720.0 ± 12.4 ^a
20 - 30 cm	765.7 ± 1.9 ^a	753.7 ± 41.8 ^a	753.5 ± 36.8 ^a	711.4 ± 50.2 ^a
30 - 40 cm	767.7 ± 7.6 ^a	757.5 ± 43.7 ^a	652.7 ± 17.0 ^a	732.5 ± 48.6 ^a

Table 4: Valeurs de la concentration de SiO₂ total par profondeur dans le sol sous prairie, *P. nigra*, *P. aureosulcata* et *P. aurea* exprimées en mg de SiO₂ par g de matière sèche. Les données sont présentées sous forme de moyenne ± SD (n=3). Des lettres différentes dans la même profondeur indiquent des différences significatives entre les types de végétation à p<0,05 (Tukey HSD).

3.1.2 Distribution en profondeur du stock de SiO₂

La Table 5 montre l'évolution du stock de SiO₂ [kgSiO₂ m⁻²] pour chaque profondeur pour chaque espèce de bambou ainsi que la prairie.

	kgSiO ₂ m ⁻²			
	Prairie	<i>P. nigra</i>	<i>P. aureosulcata</i>	<i>P. aurea</i>
0 - 10 cm	101.7 ± 7.4 ^a	56.2 ± 0.6 ^b	16.3 ± 3.3 ^c	50.6 ± 2.12 ^b
10 - 20 cm	156.6 ± 0.9 ^a	98.2 ± 10.2 ^b	70.7 ± 4.3 ^c	90.0 ± 1.6 ^b
20 - 30 cm	145.5 ± 0.4 ^a	121.3 ± 6.7 ^b	75.4 ± 3.6 ^c	125.2 ± 8.8 ^b
30 - 40 cm	141.2 ± 1.4 ^b	144.7 ± 8.4 ^a	125.1 ± 6.1 ^c	143.6 ± 9.5 ^b

Table 5: Valeurs des stocks de SiO₂ total par profondeur dans le sol sous prairie, *P. nigra*, *P. aureosulcata* et *P. aurea* exprimées en kg de SiO₂ par m⁻². Les données sont présentées sous forme de moyenne ± SD (n=3). Des lettres différentes dans la même profondeur indiquent des différences significatives entre les types de végétation à p<0,05 (Tukey HSD).

3.1.3 Stock de SiO₂ total dans les 40 premiers cm

Le stock de SiO₂ [kgSiO₂ m⁻²]total déterminée par la méthode pXRF dans les 40 premiers cm de sol sous chaque parcelle est présentée à la Figure 12. Les valeurs détaillées sont présentées en Annexe 8.

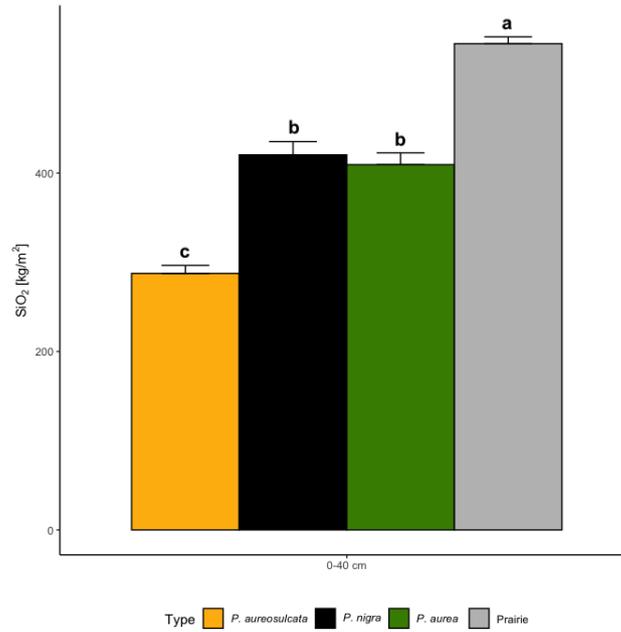


Figure 12: Stocks de SiO₂ total dans les 40 premiers cm dans le sol sous prairie, *P. nigra*, *P. aureosulcata* et *P. aurea*, exprimée en kgSiO₂ m⁻². Les données sont présentées sous forme de moyenne ± SD (n=3). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les types de végétation à p<0,05 (Tukey HSD).

3.2 SiO₂ contenu dans les feuilles

La Figure 13 montre les teneurs de SiO₂ [%] dans les FC et les FL. Les valeurs détaillées sont présentées en Annexe 9.

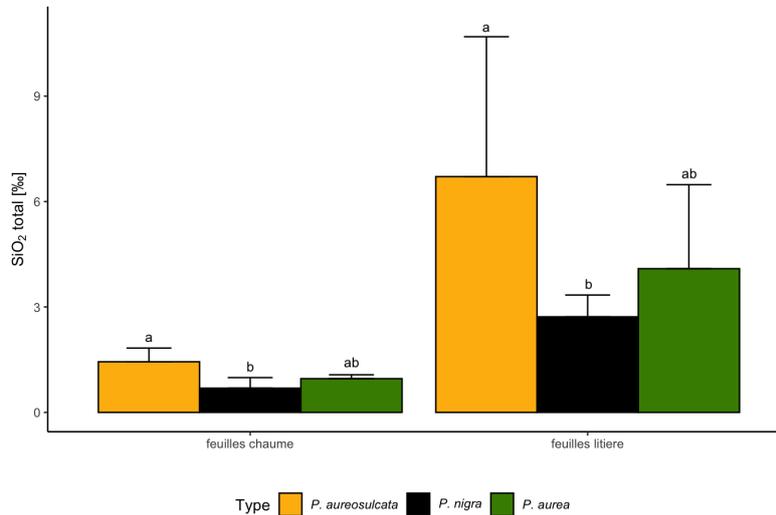


Figure 13: Valeurs des teneurs en SiO₂ total dans les feuilles de *P. aureosulcata*, *P. nigra* et *P. aurea*, exprimées en % de SiO₂. Les données sont présentées sous forme de moyenne ± SD (n=4 pour FC, n=3 pour FL). Des lettres différentes indiquent, par type de feuille, des différences significatives entre les types de végétation à p<0,05 (Tukey HSD).

3.3 Distribution en profondeur du SiO₂ disponible

La Figure 14 montre l'évolution des concentrations de SiO₂ disponible [mgSiO₂ g⁻¹] pour chaque profondeur pour chaque espèce de bambou ainsi que la prairie. Les valeurs détaillées sont présentées en Annexe 10.

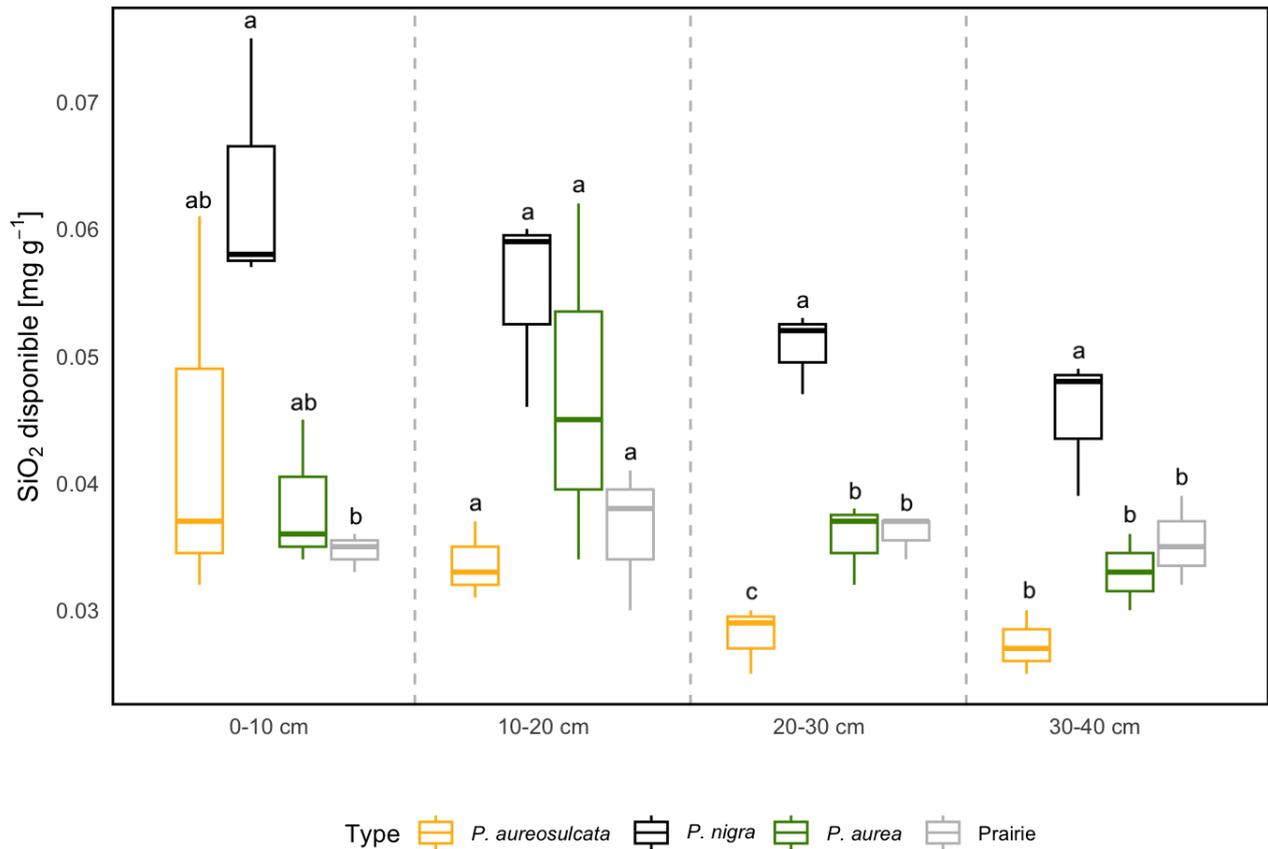
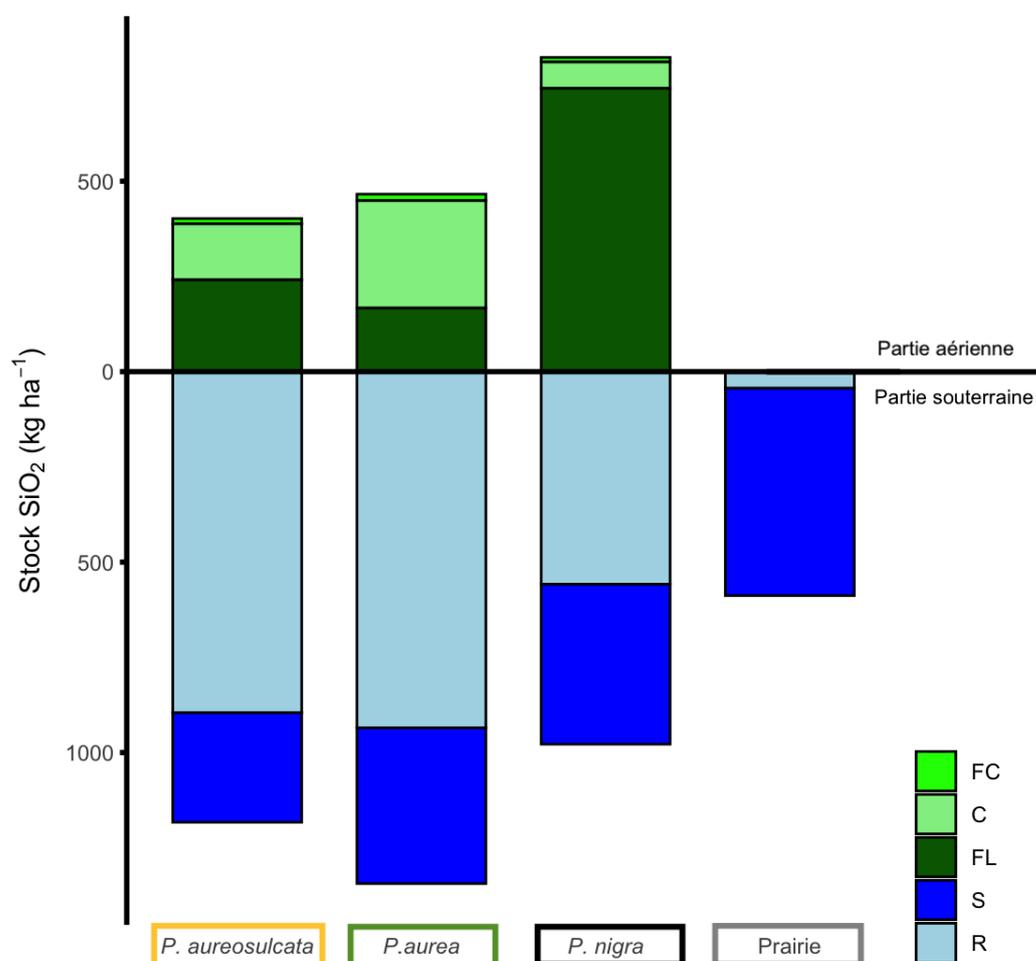


Figure 14: Valeurs du SiO₂ disponible exprimées en mgSiO₂ g⁻¹ par profondeur dans le sol sous prairie, *P. nigra*, *P. aureosulcata* et *P. aurea*. Les données sont présentées sous forme de moyenne \pm SD (n=3). Des lettres différentes indiquent, par profondeur, des différences significatives entre les types de végétation à p<0,05 (Tukey HSD).

3.4 Bilan des stocks de SiO₂

La Figure 15 reprend pour chaque parcelle, une estimation du stock de SiO₂ total [kgSiO₂ ha⁻¹] dans chaque compartiment constituant le système sol-plante. Les valeurs associées sont reprises dans la Table 6).



	Stock SiO ₂ (kg ha ⁻¹)			
	<i>P. aureosulcata</i>	<i>P. aurea</i>	<i>P. nigra</i>	Prairie
FC	14	17	12	0
C	147	282	70	0
FL	241	167	744	0
Total partie aérienne	402	466	826	0
R	895	935	558	43
S	288 × 10 ⁴	409 × 10 ⁴	420 × 10 ⁴	545 × 10 ⁴
Total partie souterraine	288 × 10 ⁴	409 × 10 ⁴	420 × 10 ⁴	545 × 10 ⁴

Table 6: Bilan des stocks de SiO₂ dans chaque élément pour *P. aureosulcata*, *P. aurea*, *P. nigra* et la prairie exprimés en kgSiO₂ ha⁻¹. Code: FC = feilles chaume, C = chaume, FL = feilles litière, R = racines, S = Sol.

3.5 Analyses par imagerie MEB

Les sols sont principalement constitués de quartz et présentent davantage de MO dans les deux premières profondeurs (Figures 16 et 17). Deux structures physiques principales sont observées sur les feuilles de bambous (Figure 18 et 19): i) des appendices épidermiques appelés trichomes (tr) de type « prickle hair » dont les pointes sont fortement chargées en Si, et ii) des phytolithes dits en forme de selle (s). Ces deux structures sont présentes davantage chez *P. aureosulcata* et *P. aurea* que chez *P. nigra*, qui présente quant à lui de nombreux stomates riches en Si. L'image de FL de *P. aureosulcata* montrent la présence d'amibes à test (Figure 19 (d.1,d.2))ou encore d'autres types de phytolithes (Figure 19 (d.3)). Dans les racines, du Si est observable dans les cellules endodermiques (Figures 20 et 21). Les rameaux présentent des endroits riches en Si mais de manière plus sporadique (Figures 22 et 23).

3.5.1 Sol

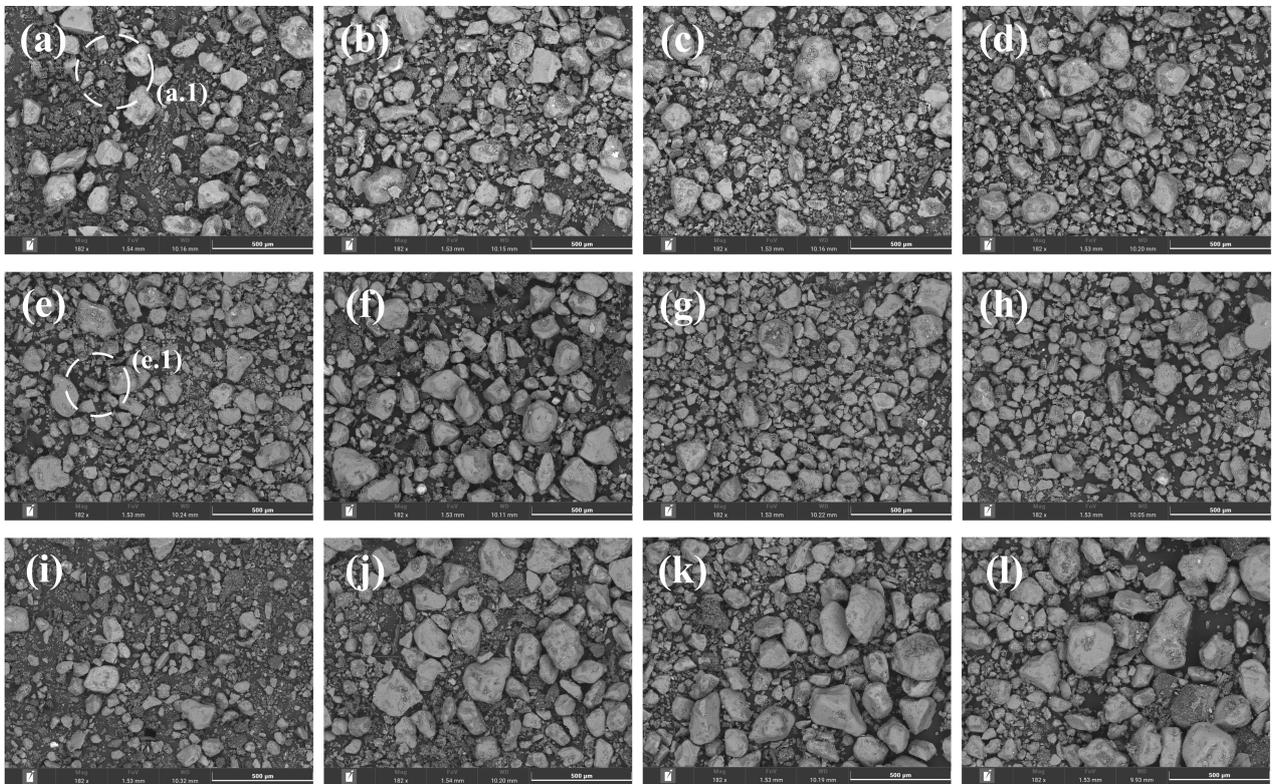


Figure 16: Photographies MEB de sols des parcelles de *P. aureosulcata* (a-d), *P. nigra* (e-h) et *P. aurea* (i-l). Chaque image correspond à une profondeur différentes allant de 0 – 10 cm à 30 – 40 de gauche à droite.

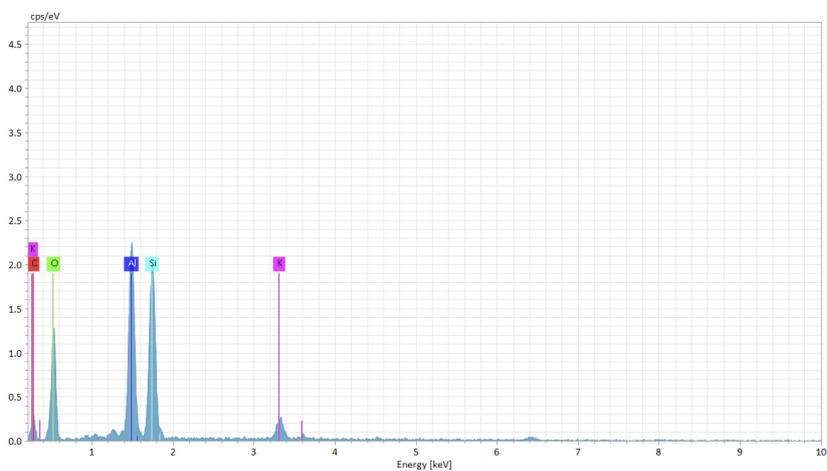
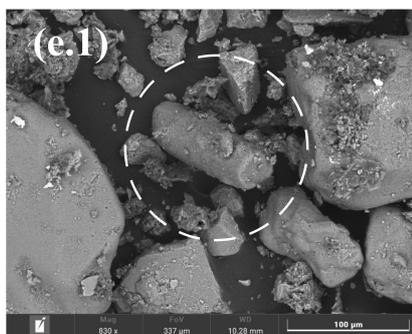
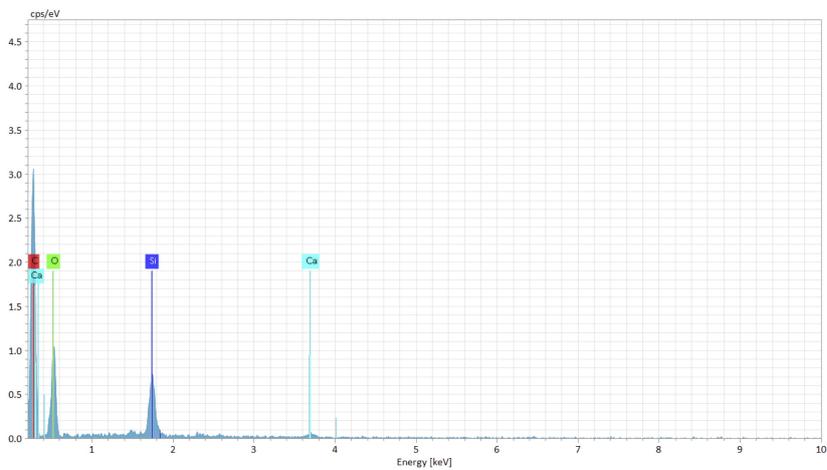
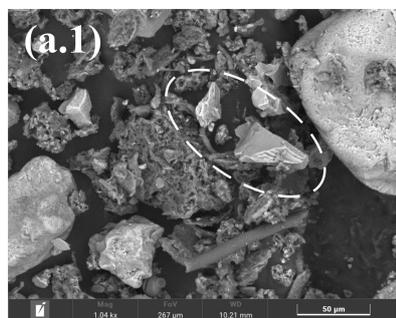
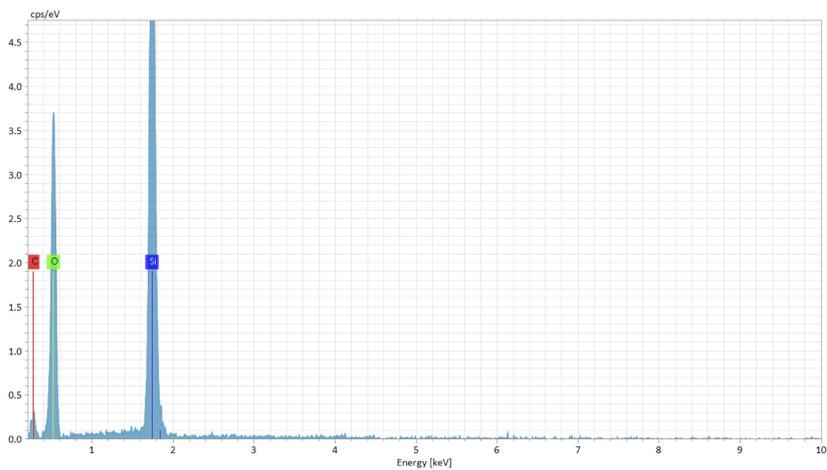
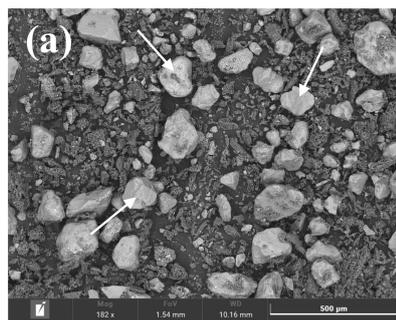


Figure 17: Photographies MEB avec les spectres correspondants de sols des parcelles de *P. aureosulcata* (a, a.1), *P. nigra* (e.1). (a) Sol de la couche 0 – 10 cm, les flèche indiquent des grains de quartz.

3.5.2 Feuilles

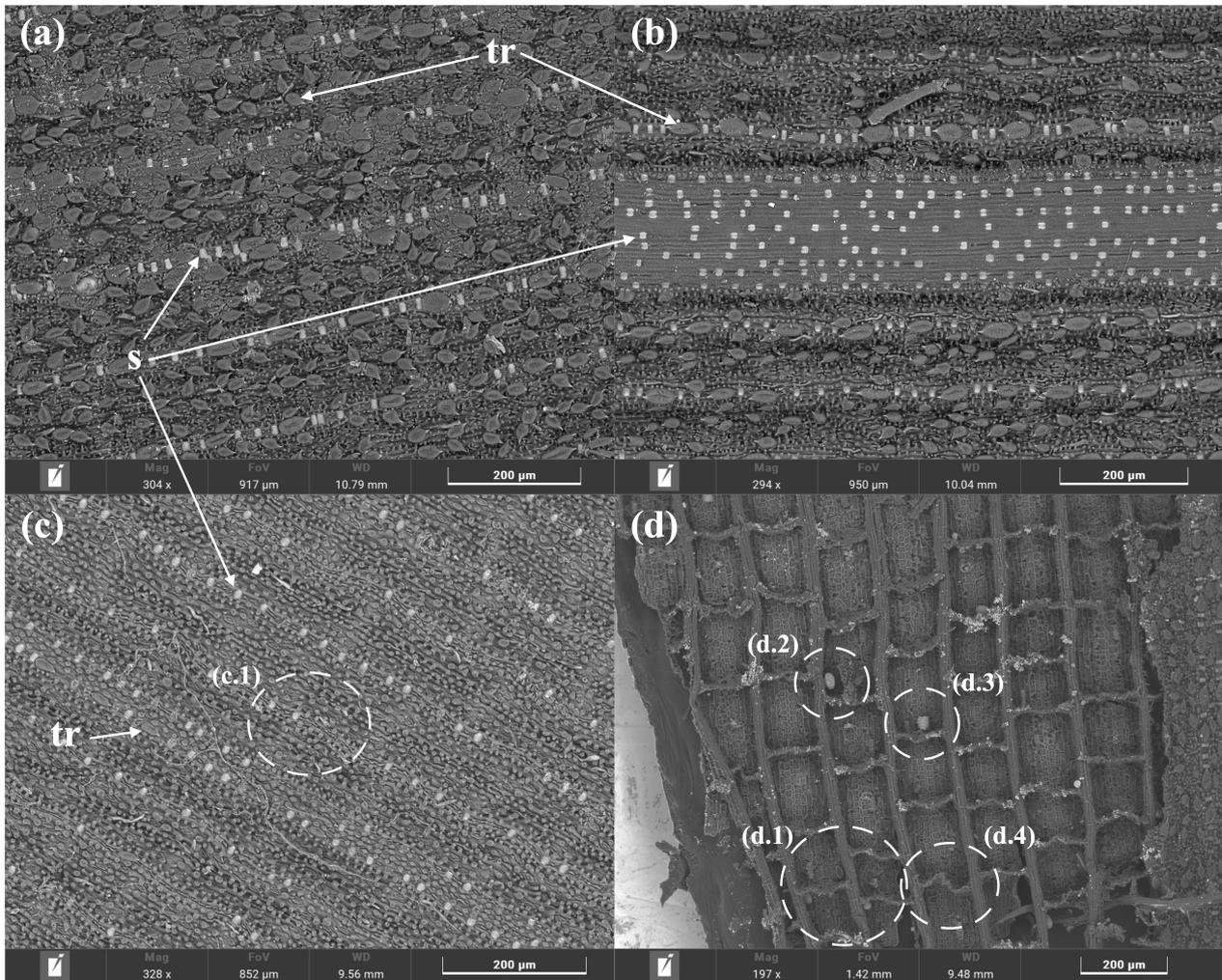
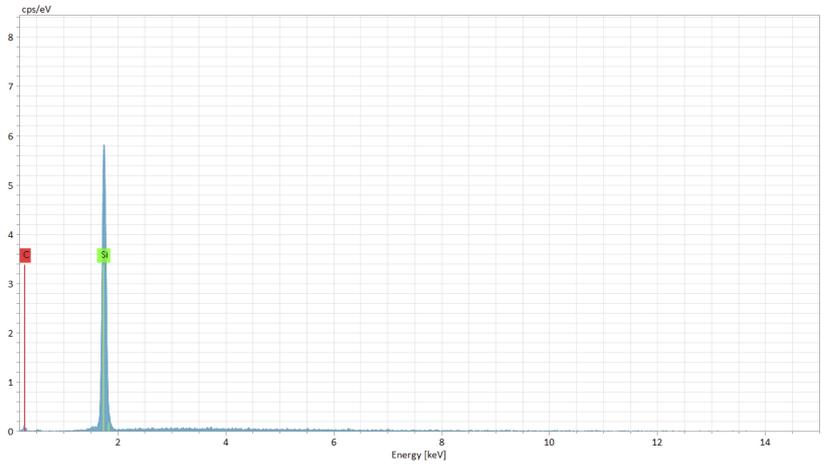
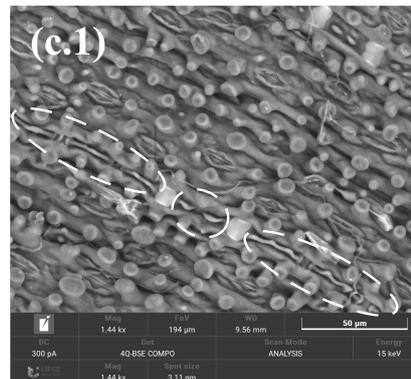
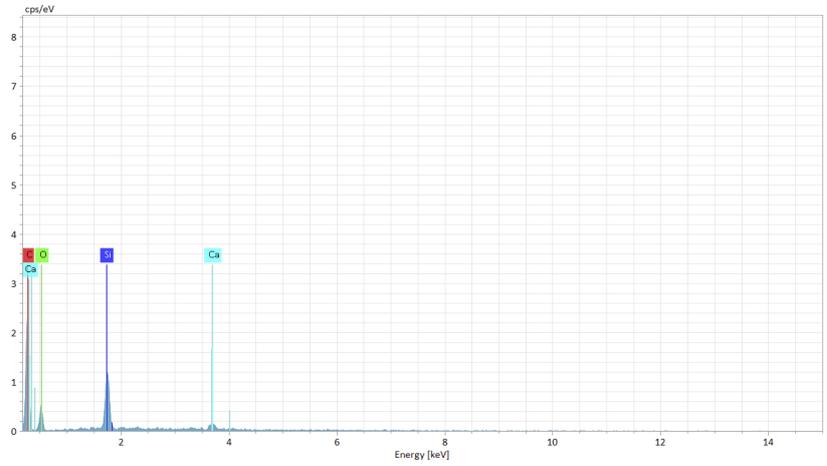
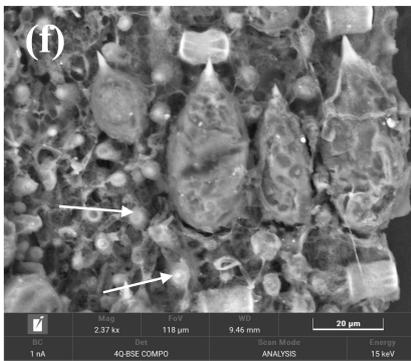
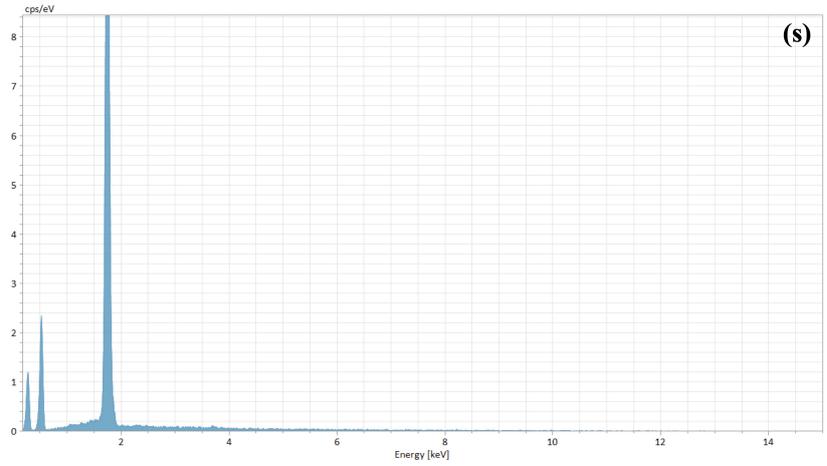
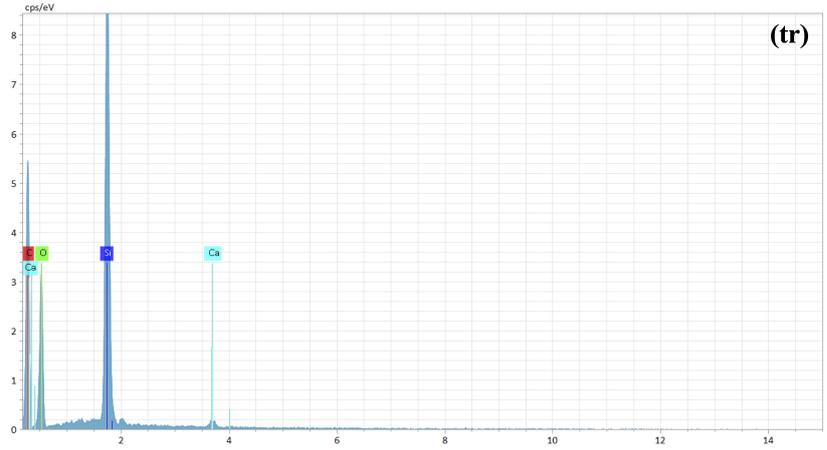
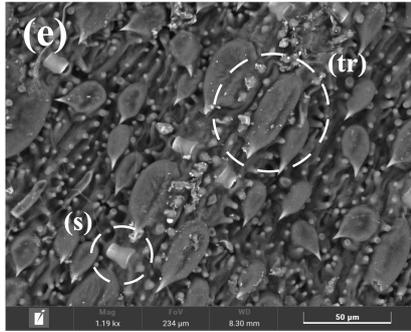


Figure 18: Photographies MEB de Feuilles de *P. aureosulcata* (a), *P. aurea* (b) et de *P. nigra* (c) et feuille de litière de *P. aureosulcata* (d). (a-d) Surface abaxiale de feuille avec des phytolithes en selle (s) et des trichomes de type « prickly hairs » (tr).



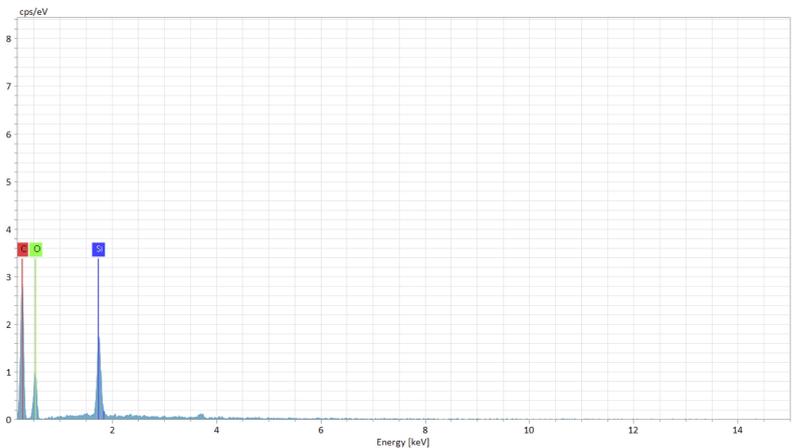
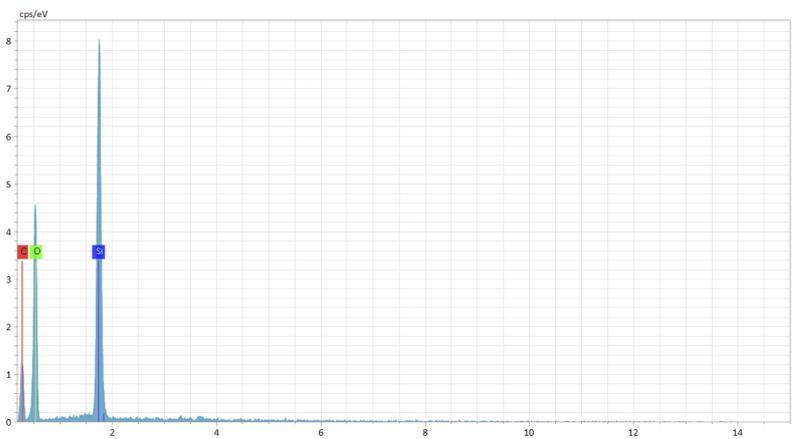
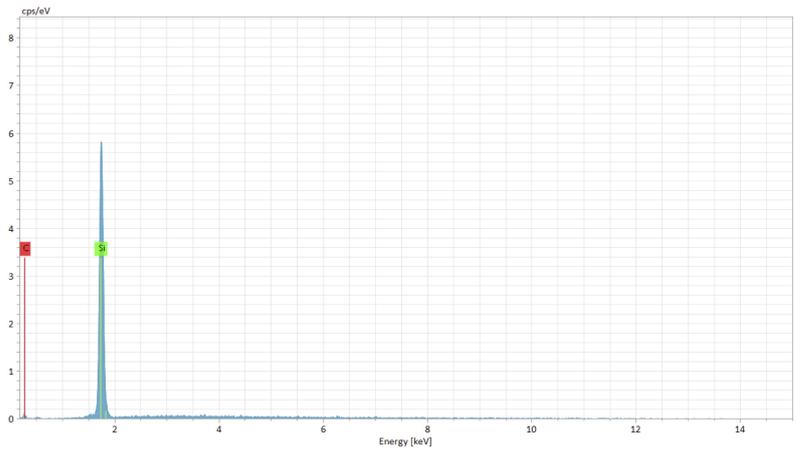
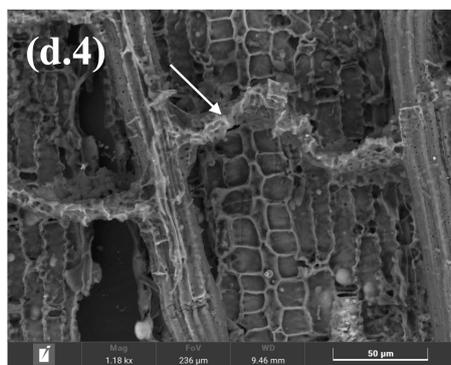
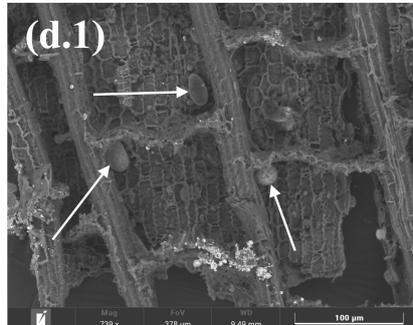


Figure 19: Photographies MEB avec les spectres correspondants de feuilles de *P. aureosulcata* (e,f), *P. nigra* (c.1) et de feuilles de litière de *P. aureosulcata* (d.1-d.4). (e) Surface abiaxiale de feuille avec des phytolithes en selle (s) et des trichomes de type « prickle hairs » (tr). (d.1, d.2) Amibe à test en Si. (d.3) Phytolithe. Les spectres correspondent aux éléments associés aux flèches et aux zones pointillées ou à l'élément au centre de l'image.

3.5.3 Racines

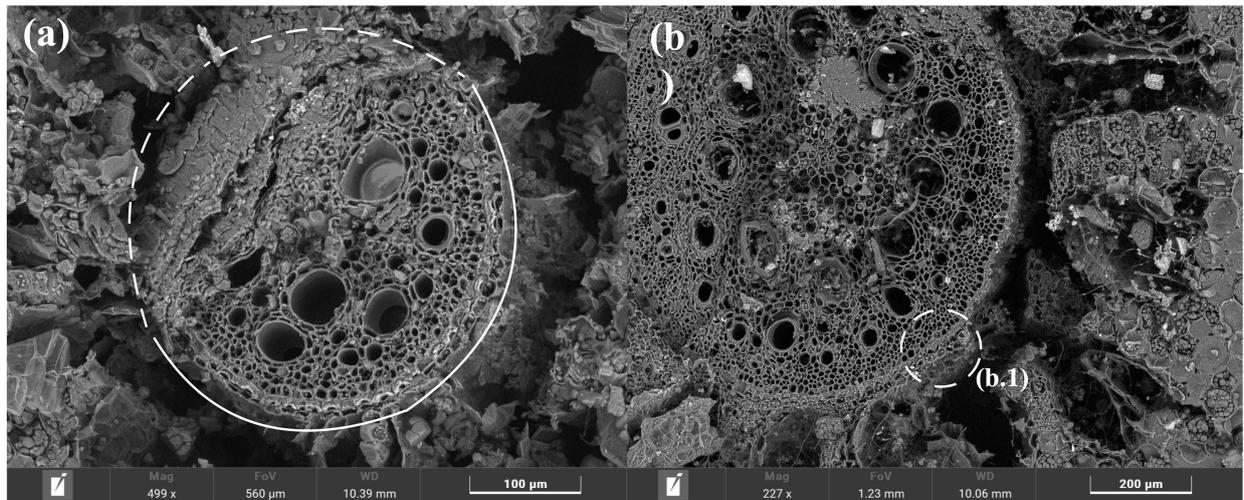


Figure 20: Photographies MEB de racines de *P. aurea* (a) et *P. aureosulcata* (b) en coupe transversale. (a) Le cercle blanc montre la délimitation de l'endoderme où il y a accumulation de Si.

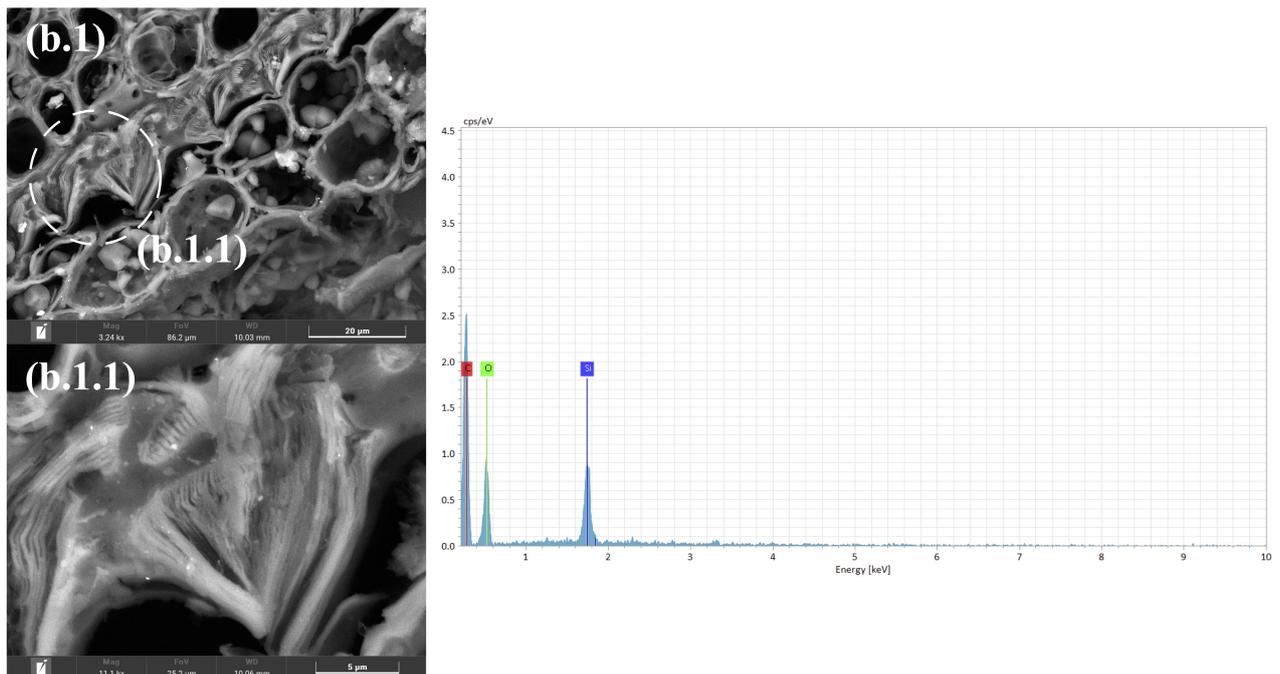


Figure 21: Photographies MEB avec le spectre correspondant de racines de *P. aureosulcata* zoomée sur l'endoderme. Le spectre correspond aux éléments associés à la zone pointillée ou à l'élément au centre de l'image.

3.5.4 Rameaux

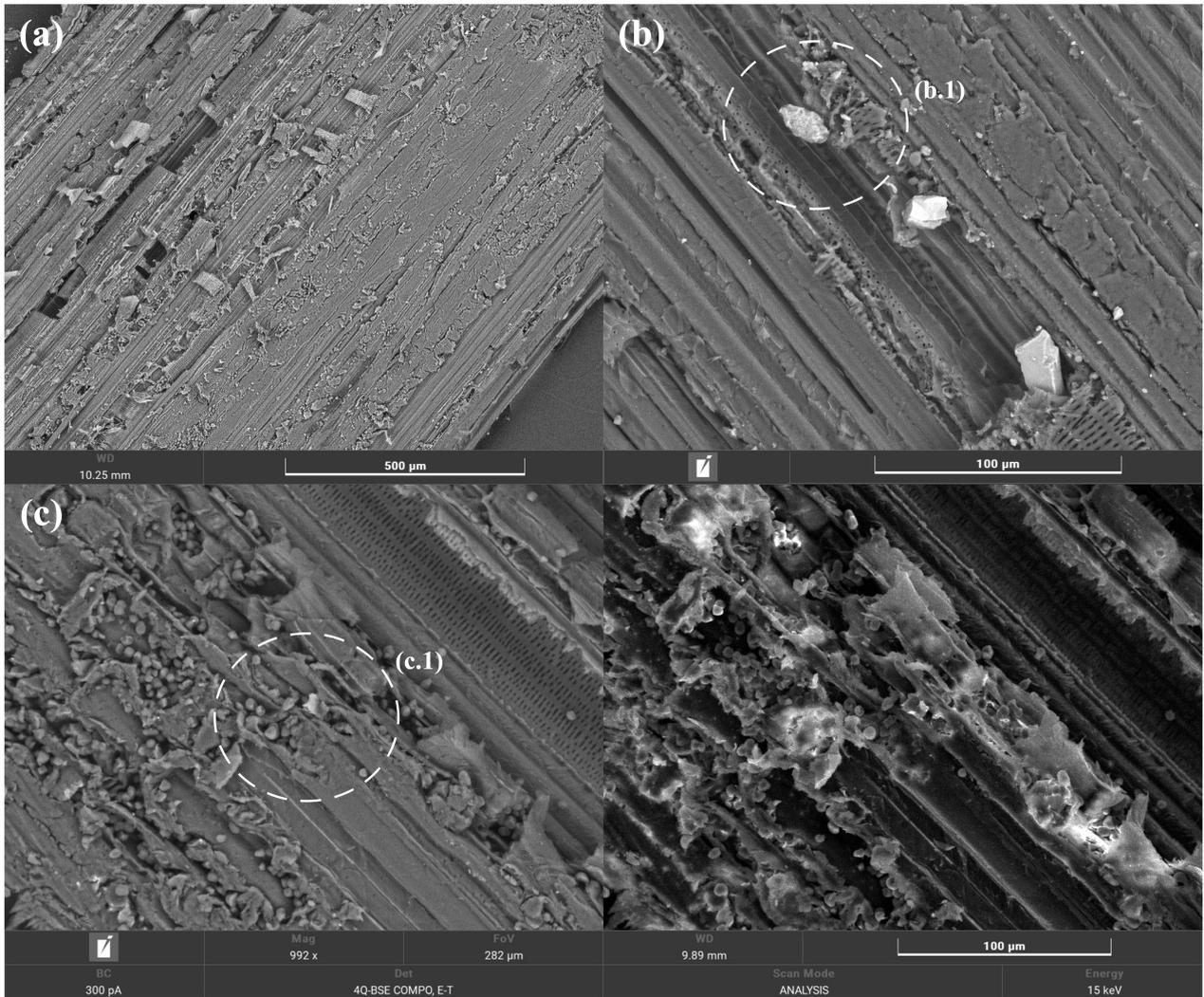
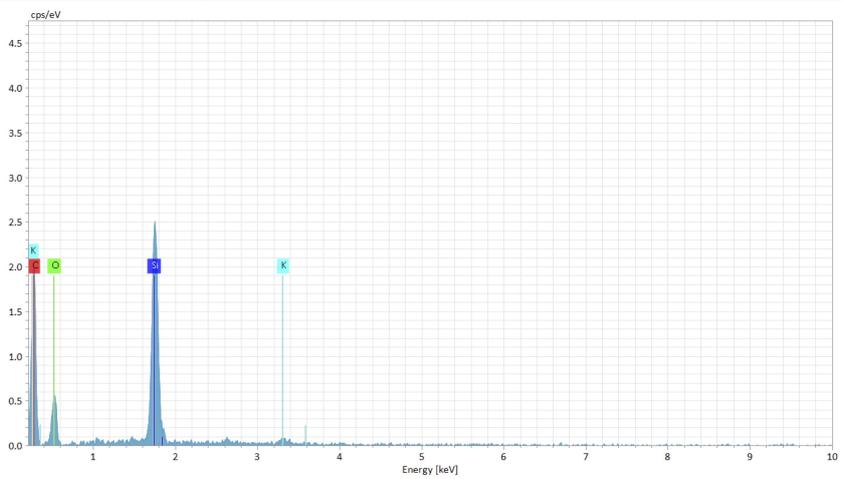
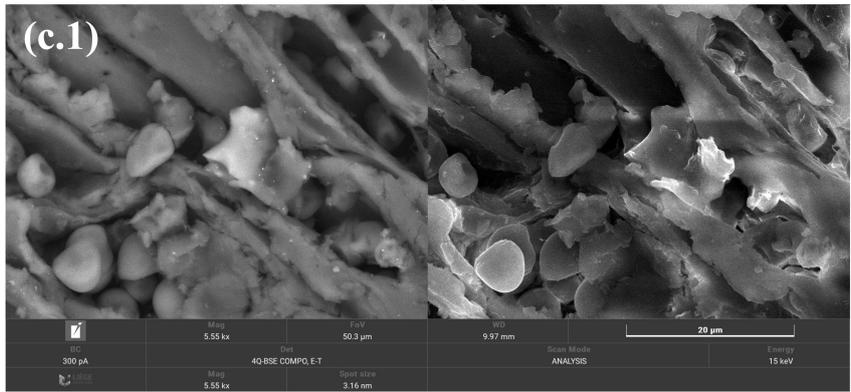
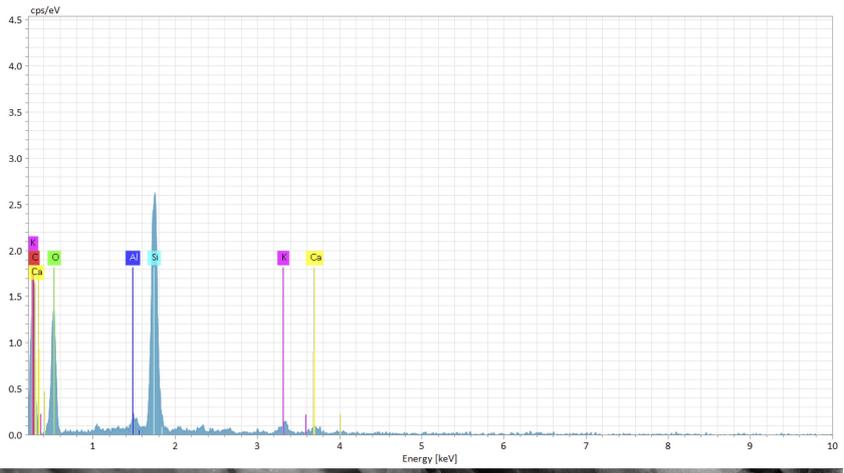
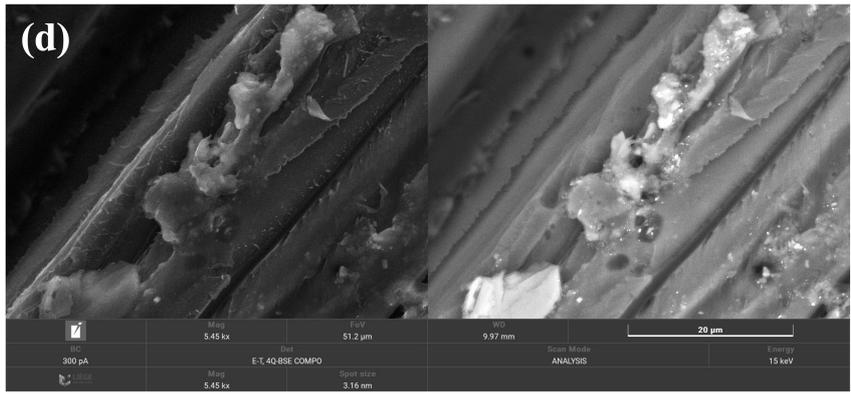


Figure 22: Photographies MEB de rameaux de *P. aureosulcata* (a-c) en coupe longitudinale. *Note: (c) Image en BSE COMPO et E-T respectivement à gauche et à droite.*



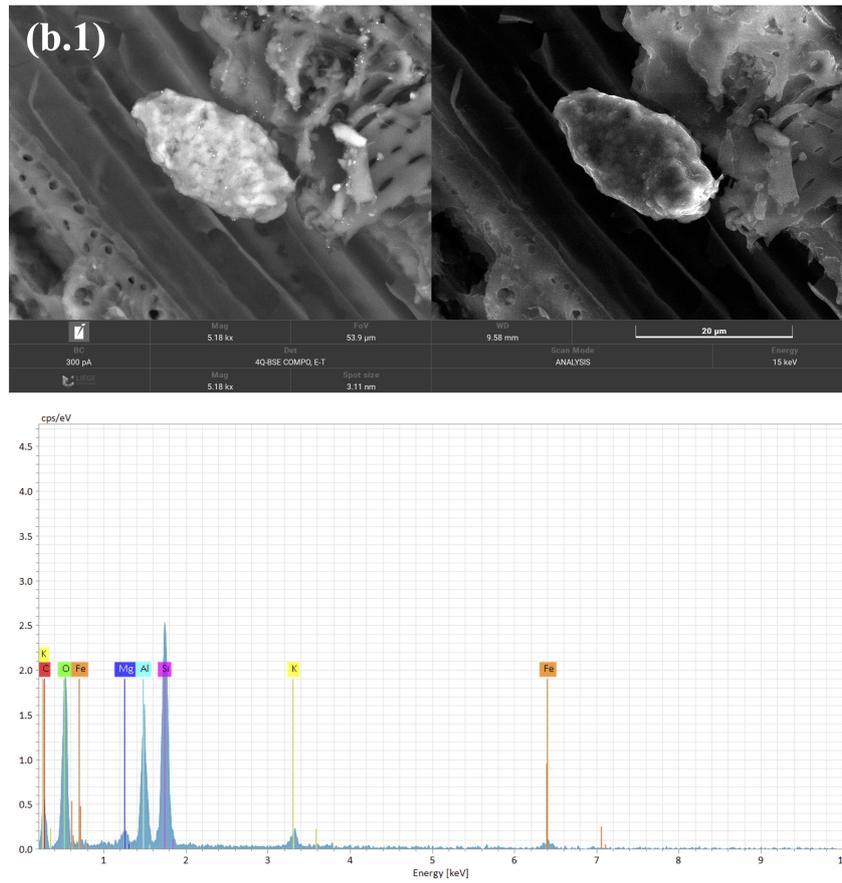


Figure 23: Photographies MEB avec les spectres correspondants de rameaux de *P. aureosulcata* (d, b.1, c.1). (d) Image en ET et BSE-compo respectivement à gauche et à droite. (b.1,c.1) Images en BSE COMPO et E-T respectivement à gauche et à droite.

3.6 pXRF vs fusion alcaline

La Figure 24 montre la comparaison entre les deux méthodes d'analyses étudiées pour mesurer le Si total, sans effet de répétition. Les coefficients de corrélation et de détermination sont repris à la Table 7.

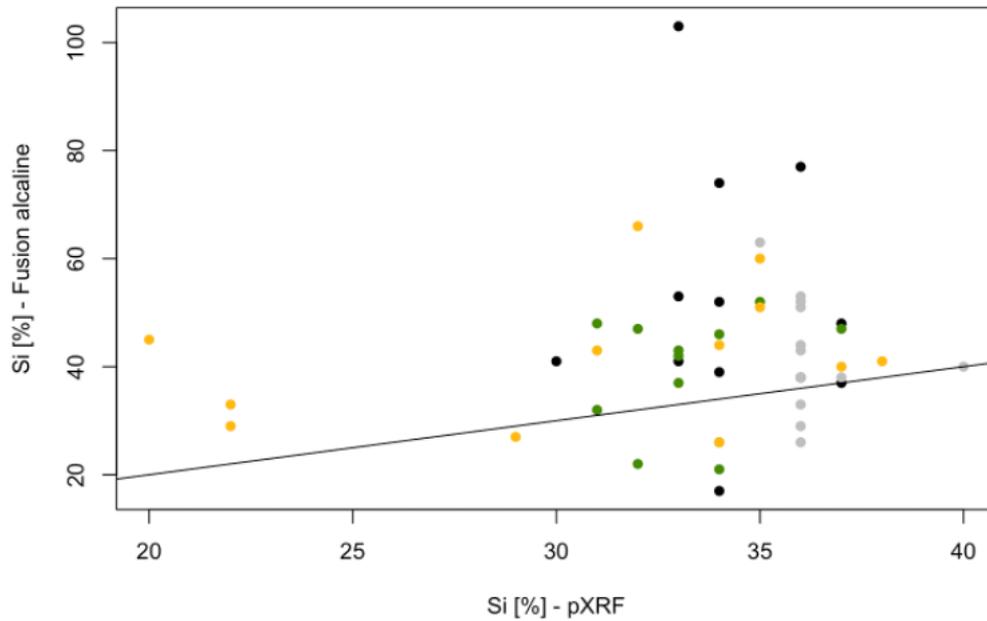
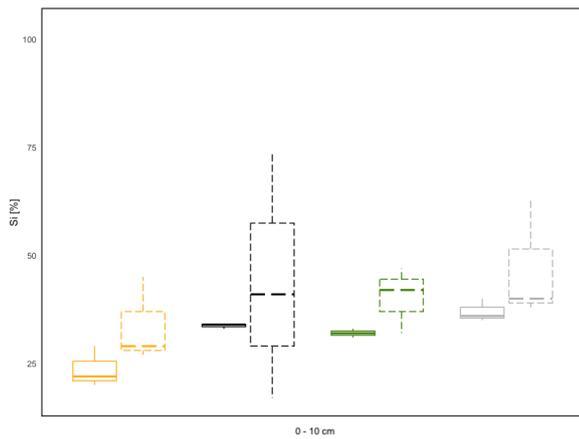


Figure 24: Comparaison entre le Si mesuré en % par fusion alcaline et par pXRF. La teneur en Si est évaluée sous prairie (gris), *P. aureosulcata* (jaune), *P. nigra* (noir) et *P. aurea* (vert). La ligne 1 :1 est la ligne noire.

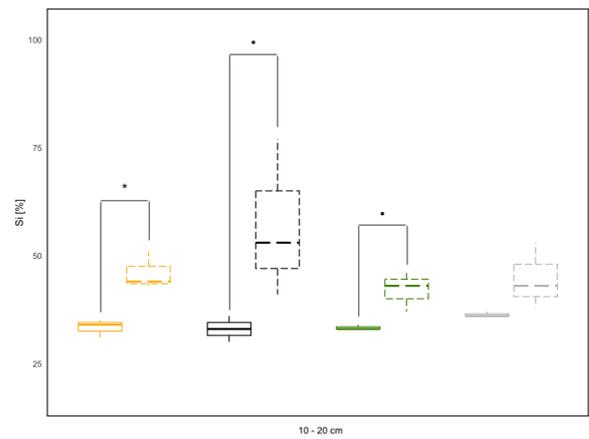
	r	R ²
pXRf * Fusion	0.1206	0.0145

Table 7: coefficients de corrélation et de détermination

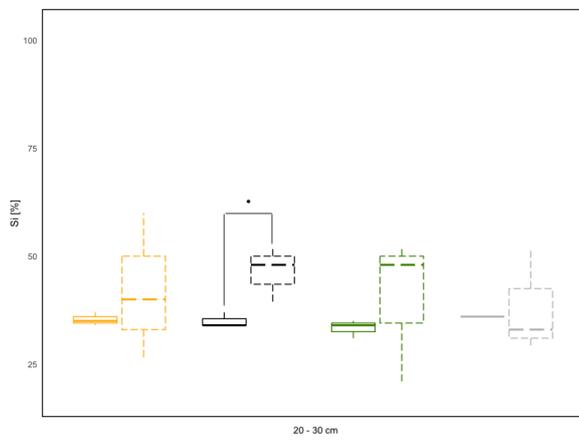
La Figure 26 montre la comparaison entre les deux méthodes d'analyses étudiées pour mesurer le Si total, avec effet de répétition et par profondeur.



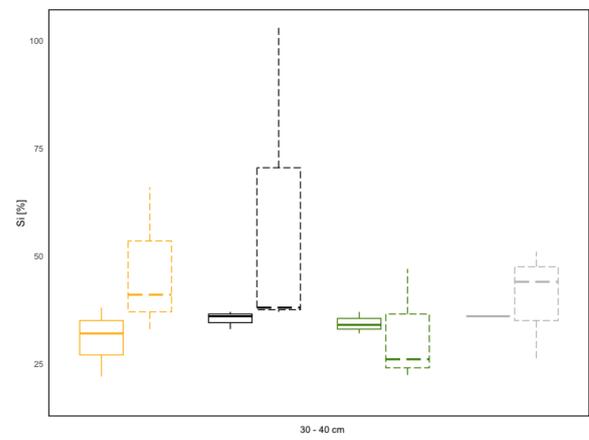
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 25: Boxplots de comparaison des teneur de Si [%] ($n=3$) selon la méthode pXRF (en pointillés) et de fusion (en trait plein) pour la prairie (gris), *P. aureosulcata* (jaune), *P. nigra* (noir) et *P. aurea* (vert). Pas de symbole $p > 0,1$, • $p < 0,1$ (niveau de confiance de 90%), $p < 0,05$ (niveau de confiance de 95%), $p < 0,01$ (niveau de confiance de 99%), $p < 0,001$.

4 Discussion

4.1 Caractéristiques des concentrations de Si dans les feuilles du bambou

Pour être qualifiées de plantes accumulatrices de Si, il faut que les plantes présentent une teneur supérieure à 1% et un rapport Si/Ca supérieur à 1 (Ma and Takahashi, 2002b). Toutefois, la seconde exigence n'a pas été démontrée. Au regard des concentrations de Si dans les FC, les trois espèces de bambou étudiées ne peuvent être considérées comme des plantes accumulatrices, car elles présentent des teneurs inférieures à ce seuil. Cependant, les concentrations de Si dans les FL dépassent ce seuil pour *P. nigra*, *P. aurea* et *P. aureosulcata* (1,27%, 1,91% et 3,14% respectivement). Les niveaux de Si dans les FL pour *P. aureosulcata* correspondent aux valeurs rapportées par Li et al., 2006 pour des *P. pubescens* (3,10%), bien que ces valeurs soient globalement plus basses que celles d'autres études sur d'autres espèces de bambou (4,8% à 17,3%) (Ding et al., 2008a; Umemura and Takenaka, 2014; Xu et al., 2023).

Les valeurs relativement faibles de Si dans les FC sont difficiles à expliquer compte tenu de la taxonomie des trois espèces de bambou étudiées. En effet, le genre *Phyllostachys* est reconnu pour inclure des espèces fortement accumulatrices de Si. Il semble donc peu probable que ces trois espèces dérogent à cette tendance. Comme les FL sont plus matures lorsqu'elles tombent au sol, cela pourrait indiquer que la concentration en Si dans les feuilles augmente avec le temps, ce qui suggérerait une capacité à accumuler du Si. Xu et al., 2023 ont montré, pour *Ferocalamus strictus*, que la teneur en Si augmentait progressivement avec la maturation des bambous, une thèse également soutenue par Motomura et al., 2002, qui expliquent que l'accumulation de Si se poursuit après l'achèvement de l'expansion cellulaire dans les limbes des feuilles. Bartoli and Souchier, 1978 ont observé que la teneur en Si atteint son maximum lorsque les feuilles approchent de la sénescence. Xu et al., 2023 ont également observé que le Si a tendance à se concentrer vers le sommet des bambous, une observation qui se vérifie également dans les trois espèces étudiées (données non présentées). En émettant l'hypothèse que les faibles valeurs de concentration dans les FC sont expliquées par le manque de maturité des feuilles, il serait intéressant d'adapter la date d'échantillonnage au stade de maturité de la plante. Au regard des FL, il est également possible que ces trois espèces soient de faibles accumulatrices de Si en comparaison à d'autres espèces du même genre.

Globalement, des différences significatives de teneurs en SiO₂ sont observées entre *P. aureosulcata* et *P. nigra* dans les FC et les FL. Cette variabilité pourrait être attribuée à la variation génétique, étant donné que les conditions de sol, de climat et l'architecture du système racinaire (sympodial) sont similaires pour toutes les espèces échantillonnées. Il a aussi été observé au MEB que les FL de *P. aureosulcata* présentaient des amibes à test en Si non observées chez les deux autres espèces (Figure 19). Cependant, la contribution du Si microbien et protozoaire aux réserves de Si reste principalement qualitative (Clarke, 2003), ce qui est également le cas dans ce travail.

Concernant les stocks de SiO₂ dans les feuilles et les racines, ils semblent être fortement corrélés : au plus le stock de SiO₂ des feuilles est important, au moins le stock racinaire l'est (R² = 0,99). Il est important de rappeler que les stocks racinaires ont été évalués sur la base de données obtenues dans une autre étude et qu'il a été supposé que la concentration en SiO₂ est

la même, indépendamment de l'espèce.

Finalement, les images MEB ont montré que les trois espèces de bambous étudiées présentent du Si sous forme de phytolithes dans leurs tissus foliaires. Cependant, ces images ne permettent pas de comparaisons quantitatives. Il pourrait être intéressant de digitaliser les parties présentant du Si et de confronter ces images avec les résultats de concentration obtenus grâce à la fusion. Concernant les racines, les images ne semblaient pas montrer d'importantes quantités de Si comparé aux feuilles, en accord avec la littérature. Cependant, les racines étant le lien entre le sol et la plante, il semblerait intéressant de ne pas négliger cet organe.

4.2 Effets du bambou sur la distribution de SiO_2 dans le sol

SiO_2 disponible

Les données obtenues pour les teneurs de SiO_2 disponible (0,028 - 0,063 mg g^{-1}) sont du même ordre que celles obtenues par Umemura and Takenaka, 2014 et Cornelis et al., 2011 ayant respectivement étudié dans des sols sous bamboueraie au Japon et sous forêt tempérée en France. Le SiO_2 disponible diminue avec la profondeur. *P. nigra* se démarque par des teneurs en SiO_2 disponible plus importantes, notamment dans les horizons plus profonds. *P. aureosulcata* présente des quantités plus faibles et des différences significatives pour les horizons 20-30 et 30-40 cm par rapports aux autres parcelles.

Plusieurs facteurs influencent la disponibilité du SiO_2 dans le sol. Parmi les principaux paramètres figurent le type de sol et le matériau parental, mais ceux-ci sont identiques au sein de toutes les parcelles. Un autre facteur est le changement historique de l'utilisation des terres. Le site étudié a bien fait l'objet d'un changement d'occupation du sol en passant d'une prairie à une bamboueraie. Étant donné qu'aucun intrant n'est ajouté, la seule différence apportée est la présence de végétaux différents et donc de matière organique, ce qui est également un facteur principal quant à la disponibilité du Si. L'hypothèse impliquant la cause de la végétation sur les différences des teneurs en SiO_2 disponible pourrait être envisagée.

Si l'on considère qu'il n'y a que les feuilles qui retournent au sol, il existe une relation linéaire entre les stocks de SiO_2 dans les feuilles (FC + FL) et le SiO_2 disponible ($R^2 = 0,86$). Celle-ci semble indiquer qu'au plus il y a de SiO_2 stocké dans les feuilles, au plus il y a de SiO_2 disponible. La silice contenue dans les feuilles de bambou est sous forme de phytolithes. En faisant l'hypothèse (soutenue par De Tombeur et al., 2020) que la concentration en Si disponible pour la plante est positivement corrélée à celle des phytolithes dans les horizons de sol dominés par des minéraux de quartz, alors *P. nigra* contiendrait plus de phytolithes que *P. aurea*, qui contiendrait à son tour plus de phytolithes que *P. aureosulcata*. Les données de cette étude permettent de montrer que *P. nigra* présente le stock de SiO_2 le plus important (762 kg SiO_2 ha^{-1}). Cependant, *P. aurea* et *P. aureosulcata* présentent respectivement un stock de 183 et 256 kg SiO_2 ha^{-1} .

Les teneurs en SiO_2 disponible diminuent globalement avec la profondeur pour les trois espèces de bambou, tandis que la prairie maintient des teneurs stables sur tout le profil de sol. La répartition des phytolithes en profondeur est plutôt variable (Clarke, 2003). Cependant, les teneurs les plus élevées en phytolithes sur des sols non perturbés se retrouvent en surface et

diminuent avec la profondeur (Qader et al., 2023). Ceci confirme l'idée du rôle du retour de la matière organique des feuilles de bambou contenant du Si biogénique dans la disponibilité du Si dans le sol. Une autre relation pourrait être faite entre le SiO₂ disponible et le stock de SiO₂ racinaire pour les parcelles bambou : au plus le stock dans les racines est important, au moins il y a de SiO₂ disponible ($R^2 = 0,88$).

SiO₂ total

L'analyse de chaque profondeur de sol permet d'affirmer que toutes les différences significatives de teneurs en SiO₂ entre la prairie et les trois espèces de bambou se situent entre 0 et 20 cm de profondeur, excepté pour le *P. aurea* qui présente des différences jusqu'à 30 cm. Dans ces horizons, la prairie présente des teneurs plus élevées en SiO₂ que chaque espèce de bambou. Le stock de SiO₂ diminue également avec la profondeur pour chaque espèce de bambou. Ceci pourrait être expliqué par le fait que la quantité de matière organique apportée par les feuilles diminue avec la profondeur. Ceci a également été facilement observable au MEB (Figure 16).

L'évaluation globale des stocks de SiO₂ (Figure 15) permet de mettre en évidence une diminution du stock de SiO₂ total dans les sols de *P. nigra*, *P. aurea* et *P. aureosulcata* (420 10⁴, 409 10⁴, et 288 10⁴ kg ha⁻¹ respectivement) comparée à celui de la prairie (545 10⁴ kg ha⁻¹). La prise en compte des stocks dans la biomasse (FC + FL), ainsi que les potentiels stocks dans la biomasse racinaire et celle des chaumes, ne permet pas de combler ce delta qui réside donc dans le stock de SiO₂ total dans le sol (figure récap avec bar). De plus, l'exportation annuelle de matière organique (entre 20 et 30%) entraîne un déficit de retour de Si. Toutefois, cette exportation ne permet pas de combler la perte de Si.

Ces différences marquées pourraient être expliquées par plusieurs facteurs. Premièrement, il se pourrait qu'il y ait des différences initiales en termes de concentration en Si ou d'altération minérale dans les différentes parcelles. Cependant, cinq facteurs régissent la formation du sol et l'altération des minéraux rocheux : la roche mère, le climat, la topographie, l'âge et le biote (Cornelis and Delvaux, 2016). Bien que le site d'étude présente une très légère pente, cette dernière est négligée. La seule différence entre les parcelles est donc la végétation, la partie faune du biote étant négligée également car non étudiée dans le cadre de ce travail. Ainsi, l'hypothèse rendant la présence ou absence de bambou responsable des différences de stocks semble viable, en supposant que chaque espèce ait une influence différente.

Dans des types de sol fortement altérés, la source principale de Si biodisponible vient du pool de Si biogénique ; le cycle sol-plante est presque entièrement contrôlé par la boucle de rétroaction biologique du Si (Cornelis and Delvaux, 2016). Parce que les podzols sont considérés comme des sols fortement altérés, il peut alors être supposé que les phytolithes sont la principale source et le principal puits immédiat de Si en solution dans le sol (pool de Si dissous). La différence dans les stocks de SiO₂ pourrait alors être la cause d'une lixiviation plus importante pour *P. nigra* et *P. aurea*, et encore plus importante pour *P. aureosulcata*. En effet, la lixiviation des phytolithes contribue à la concentration de Si dans les solutions de sol et l'eau de drainage. Les concentrations observées sont limitées par la solubilité des phytolithes (Farmer et al., 2005) qui dépend d'une espèce à l'autre (Delhon, 2008). Il serait alors intéressant i) d'évaluer la solubilité des phytolithes des trois espèces de bambou et de les comparer avec les stocks, et ii) d'approfondir l'étude en analysant les lixiviats. Il est important de noter que la lixiviation du Si est influencée par les saisons. En hiver et au début du printemps, lorsque la prise en charge par les plantes diminue, le Si dissous provenant des phytolithes est plus susceptible d'être lixivié

du sol. Pendant la saison de croissance, presque tout le Si libéré par dissolution des phytolithes est absorbé par les plantes avant d'être retourné au sol (Farmer et al., 2005).

Farmer et al., 2005 expliquent que le lessivage du Si à travers le profil du sol est également en partie responsable de la concentration de Si observée dans les solutions de sol centrifugées et les eaux de drainage. Leurs valeurs indiquent que les concentrations de Si diminuent lorsqu'on passe de l'horizon O à l'horizon B, en partie en raison de l'absorption par les plantes et de la précipitation de Si sous forme de minéraux. L'étude sur *P. nigra*, *P. aurea* et *P. aureosulcata* ne portant que sur les 40 premiers cm, l'horizon B (Bh observé sur le site) n'est pas toujours comptabilisé ou bien délimité. Il serait intéressant de poursuivre l'étude à de plus grandes profondeurs.

4.3 Considérations techniques sur la mesure du SiO₂

Globalement, les deux méthodes de mesure testées pour la détermination du SiO₂ total ne sont pas significativement corrélées, ce qui indique qu'elles ne fournissent pas des résultats équivalents ni interchangeables pour évaluer la teneur en Si dans les sols. Pour la quantification du SiO₂ total dans les sols, la fusion alcaline se révèle (i) peu précise et (ii) peu adaptée pour un grand nombre d'échantillons en raison de son caractère très chronophage. L'écart-type relatif pour la détermination du Si par pXRF est de 1,68 à 5,65%, ce qui est nettement inférieur à celui de la fusion alcaline (10,7 à 22,1%), suggérant une plus grande variabilité de celle-ci. De plus, les valeurs obtenues par pXRF se rapprochent davantage des concentrations en Si habituellement retrouvées dans les sols sableux. Pour ces raisons, la méthode pXRF a été choisie pour mesurer les concentrations en SiO₂. Le pXRF offre une analyse élémentaire rapide, peu coûteuse, non destructive et respectueuse de l'environnement. De plus en plus d'études utilisent le pXRF pour la caractérisation des sols (Silva et al., 2021). Rosin et al., 2022 ont montré que le pXRF est un outil très utile pour les études minéralogiques et chimiques, fournissant des résultats satisfaisants pour l'estimation des teneurs en SiO₂. Cependant, leurs résultats soulignent la nécessité de prudence lors de l'interprétation des données pXRF, en particulier dans les sols sableux où la matière organique joue un rôle crucial dans la rétention des éléments.

4.4 Limites de l'étude

Bien que les conditions expérimentales aient été choisies pour être aussi proches que possible des conditions réelles, les limitations de temps, d'espace et de budget ont certainement influencé certains aspects importants de l'étude.

Premièrement, le faible nombre d'échantillons (n=3 ou 4) peut limiter la fiabilité et la validité des résultats de l'étude. Avec un échantillon restreint, la puissance statistique diminue, augmentant le risque de ne pas détecter un effet réel et rendant les résultats plus sensibles aux valeurs aberrantes. La variabilité accrue dans les données peut conduire à des estimations biaisées des paramètres statistiques, et les conclusions peuvent être trompeuses en raison de la faible représentativité de l'échantillon par rapport à la population cible. L'identification de tendances claires ou de relations entre variables doit donc être appréhendée avec précaution. Il serait judicieux d'augmenter le nombre d'échantillons pour améliorer la fiabilité et la validité des résultats tout en limitant des contraintes liées au temps.

Deuxièmement, certains stocks du bilan final ont été approximés sur la base de la littérature et en supposant des concentrations égales pour les trois espèces étudiées. La biomasse aérienne

utilisée dans la formule pour les stocks des chaumes est aussi une approximation.

De plus, la courte période d'expérimentation a rendu impossible l'observation de l'évolution souvent discutée de l'accumulation de Si au fil du temps dans les différents organes. En effet, il semble difficile d'étudier le Si sans cycle car il est très dépendant du cycle annuel de la plante.

Ensuite, l'étude s'est concentrée sur les 40 premiers cm du sol en lien avec le développement racinaire. Cependant, il serait intéressant d'observer des horizons plus profonds pour connaître le potentiel impact de la lixiviation et du lessivage. Dans le cas d'un podzol, les horizons E sont appauvris en nutriments en raison des lixiviations tandis que l'horizon Bh est davantage enrichi. Les 40 cm se situent pour les sols de l'étude au milieu de cet horizon. Dans le même ordre d'idée, les horizons ont été séparés par tranche de 10 cm, ce qui ne correspond pas aux réels horizons pédologiques pouvant être observés sur le terrain.

5 Conclusion et perspectives

5.1 Conclusion

Différents paramètres ont été étudiés dans ce mémoire afin de comparer les dynamiques du SiO_2 après la conversion, il y a 14 ans, d'une prairie permanente en bamboueraie composée de trois espèces de bambou: *P. nigra*, *P. aurea*, et *P. aureosulcata*.

Le premier objectif était de comparer les stocks de SiO_2 entre une prairie et trois espèces de bambou. Toutes les espèces de bambou ont montré des stocks de SiO_2 significativement moins élevés que la prairie sur 40 cm de profondeur. *P. aureosulcata* a montré le stock le plus bas, suivi de *P. nigra* et *P. aurea*, qui ne présentent pas de différences significatives entre elles. Cette diminution de stock de SiO_2 a été identifiée directement et uniquement comme le résultat de la conversion de la prairie permanente à une plantation de bambous. L'évaluation du stock pourrait cependant être biaisée par l'exportation de la biomasse et par des teneurs trop faibles obtenues dans les feuilles lors de la quantification. Les différents stocks de biomasse (aérienne et souterraine) ne permettent pas de combler le delta du stock perdu. Il pourrait alors être expliqué par une lixiviation et un lessivage plus importants dans les parcelles de bambou.

Le deuxième objectif était de caractériser les formes de Si dans différents organes des trois espèces de bambou, via des images microscopiques obtenues au MEB. Ces dernières ont permis de mettre en évidence pour chaque espèce des phytolithes en forme de selle. Les FC des trois espèces ont également présenté des trichomes avec des pics de Si, présents visuellement de manière plus importante dans les FC de *P. aureosulcata* et *P. aurea* que dans *P. nigra*, qui a présenté quant à lui davantage de stomates silicifiés. Les images ont également permis de mettre en lumière que du Si est présent dans les tissus internes des rameaux et des feuilles. Les FL de *P. aureosulcata* présentent également d'autres formes de phytolithes ainsi que des amibes à silice. Pour les trois espèces, des dépôts de Si dans l'endoderme des racines sont observables. De plus, les images MEB ont permis de visualiser la diminution de la MO avec la profondeur dans le sol.

5.2 Perspectives

Au regard du travail réalisé pour cette étude, certaines améliorations et suggestions peuvent être apportées. Premièrement, il semble primordial de séparer le réservoir de Si total en ses différents sous-réservoirs, à savoir le réservoir inorganique, dissous et biogénique. En effet, dans cette étude, tous ces réservoirs sont quantifiés sans distinction. Ainsi, il apparaît compliqué d'identifier et d'isoler les différents processus liés à la dynamique du SiO_2 et les réservoirs associés.

Afin de mesurer les flux de Si entre les différents compartiments de l'écosystème, il serait utile de : i) évaluer le silicium dissous dans les eaux de percolation à l'aide de lysimètres, afin de déterminer l'ampleur des processus de lixiviation et de lessivage, et ii) installer des filets de collecte pour quantifier la quantité de silicium retournée au sol via les retombées foliaires. Cela permettrait de prendre en considération des flux entrants et sortants.

En ayant connaissance des flux, le temps de renouvellement pourrait offrir davantage d'éléments sur la dynamique du Si en termes de recyclage dans l'écosystème de la bamboueraie. Cela

offrirait également l'avantage de faire des comparaisons inter-espèces et d'observer l'influence de chaque espèce sur le temps de renouvellement.

Analyser la concentration de chaque tissu, y compris les racines, les chaumes et les rameaux, semble important pour affiner l'évaluation des stocks afin de diminuer les approximations et hypothèses.

Contributions

À travers ce travail, l'objectif principal pour l'étudiant était de concevoir et de réaliser une expérience afin de répondre aux objectifs prédéterminés présentés dans la section 6 de l'introduction. L'étudiant a réussi à :

- Développer un projet en tenant compte des contraintes liées au terrain, au temps et au budget
- Planifier et réaliser une expérience
- Réaliser des expériences en laboratoire et traiter les données associées
- Collaborer et prendre des initiatives pour atteindre les objectifs

L'ensemble de la biomasse aérienne a été collectée avec Marie Dincher et Jeroen Meersmans. Les échantillons de sol utilisés sont ceux collectés par Nicolas Kovacs lors de son travail de fin d'étude en 2022.

References

- Armbrust, E. V. (2009). The life of diatoms in the world's oceans. *Nature*, *459*(7244), 185–192. <https://doi.org/10.1038/nature08057>
- Arnon, D. I., & Stout, P. R. (1939). THE ESSENTIALITY OF CERTAIN ELEMENTS IN MINUTE QUANTITY FOR PLANTS WITH SPECIAL REFERENCE TO COPPER. *Plant Physiology*, *14*(2), 371–375. <https://doi.org/10.1104/pp.14.2.371>
- Bartoli, F., & Souchier, B. (1978). Cycle et rôle du silicium d'origine végétale dans les écosystèmes forestiers tempérés. *Annales des Sciences Forestières*, *35*(3), 187–202. <https://doi.org/10.1051/forest/19780302>
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023, July). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (tech. rep.). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Clarke, J. (2003). The occurrence and significance of biogenic opal in the regolith. *Earth-Science Reviews*, *60*(3-4), 175–194. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00092-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00092-2)
- Conley, D. J., & Carey, J. C. (2015). Silica cycling over geologic time. *Nature Geoscience*, *8*(6), 431–432. <https://doi.org/10.1038/ngeo2454>
- Conley, D. J., Sommer, M., Meunier, J., Kaczorek, D., & Saccone, L. (2006). Silicon in the terrestrial biogeosphere. In *The silicon cycle: Human perturbations and impacts on aquatic systems* (pp. 13–28, Vol. 66). Island Press Washington, DC, USA.
- Cooke, J., & Leishman, M. R. (2016). Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: A meta-analysis (S. Hartley, Ed.). *Functional Ecology*, *30*(8), 1340–1357. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12713>
- Cornelis, J.-T., & Delvaux, B. (2016). Soil processes drive the biological silicon feedback loop (J. Cooke, Ed.). *Functional Ecology*, *30*(8), 1298–1310. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12704>
- Cornelis, J.-T., Titeux, H., Ranger, J., & Delvaux, B. (2011). Identification and distribution of the readily soluble silicon pool in a temperate forest soil below three distinct tree species. *Plant and Soil*, *342*(1-2), 369–378. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0702-x>
- Coskun, D., Deshmukh, R., Sonah, H., Menzies, J. G., Reynolds, O., Ma, J. F., Kronzucker, H. J., & Bélanger, R. R. (2019). The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist*, *221*(1), 67–85. <https://doi.org/10.1111/nph.15343>
- De Bakker, N., Hemminga, M. A., & Van Soelen, J. (1999). The relationship between silicon availability, and growth and silicon concentration of the salt marsh halophyte *Spartina anglica*. *Plant and Soil*, *215*(1), 19–27. <https://doi.org/10.1023/A:1004751902074>
- De Tombeur, F., Turner, B. L., Laliberté, E., Lambers, H., Mahy, G., Faucon, M.-P., Zemunik, G., & Cornelis, J.-T. (2020). Plants sustain the terrestrial silicon cycle during ecosystem retrogression. *Science*, *369*(6508), 1245–1248. <https://doi.org/10.1126/science.abc0393>
- De Tombeur, F. (2021). *Soil-plant silicon dynamics in natural ecosystems and agroecosystems* [Doctoral dissertation, UNIVERSITÉ DE LIÈGE – GEMBLoux AGRO-BIO TECH].
- De Tombeur, F., Raven, J. A., Toussaint, A., Lambers, H., Cooke, J., Hartley, S. E., Johnson, S. N., Coq, S., Katz, O., Schaller, J., & Violle, C. (2023). Why do plants silicify? *Trends in Ecology & Evolution*, *38*(3), 275–288. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.11.002>

- Delhon, C. (2008). Potentiel de l'analyse des phytolithes contenus dans les pâtes céramiques et les matériaux de construction. In *Dégraissants organiques : Identifications, nomenclatures et référentiels* (S.n.).
- Deshmukh, R., Sonah, H., & Belanger, R. R. (2020). New evidence defining the evolutionary path of aquaporins regulating silicon uptake in land plants (M. Vaculik, Ed.). *Journal of Experimental Botany*, *71*(21), 6775–6788. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa342>
- Ding, T., Zhou, J., Wan, D., Chen, Z., Wang, C., & Zhang, F. (2008a). Silicon isotope fractionation in bamboo and its significance to the biogeochemical cycle of silicon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *72*(5), 1381–1395. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.008>
- Ding, T., Zhou, J., Wan, D., Chen, Z., Wang, C., & Zhang, F. (2008b). Silicon isotope fractionation in bamboo and its significance to the biogeochemical cycle of silicon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *72*(5), 1381–1395. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.01.008>
- Dlamini, L. C., Fakudze, S., Makombe, G. G., Muse, S. =., & Zhu, J. (2021). Bamboo as a valuable resource and its utilization in historical and modern-day China. *BioResources*, *17*(1), 1926–1938. <https://doi.org/10.15376/biores.17.1.Dlamini>
- Dove, P. M. (1995). Kinetic and thermodynamic controls on silica reactivity in weathering environments. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, *31*(1), 235–290.
- Epstein, E. (1994). The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *91*(1), 11–17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
- Epstein, E. (1999). SILICON. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, *50*(1), 641–664. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>
- Epstein, E. (2001). Chapter 1 Silicon in plants: Facts vs. concepts. In *Studies in Plant Science* (pp. 1–15, Vol. 8). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80005-7](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80005-7)
- Farmer, V., Delbos, E., & Miller, J. (2005). The role of phytolith formation and dissolution in controlling concentrations of silica in soil solutions and streams. *Geoderma*, *127*(1-2), 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.014>
- Fraysse, F., Cantais, F., Pokrovsky, O., Schott, J., & Meunier, J. (2006). Aqueous reactivity of phytoliths and plant litter: Physico-chemical constraints on terrestrial biogeochemical cycle of silicon. *Journal of Geochemical Exploration*, *88*(1-3), 202–205. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.08.039>
- Fraysse, F., Pokrovsky, O. S., Schott, J., & Meunier, J.-D. (2009). Surface chemistry and reactivity of plant phytoliths in aqueous solutions. *Chemical Geology*, *258*(3-4), 197–206. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.003>
- Gaillardet, J., Dupré, B., Louvat, P., & Allègre, C. (1999). Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology*, *159*(1-4), 3–30. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00031-5)
- Gérard, F., Mayer, K., Hodson, M., & Ranger, J. (2008). Modelling the biogeochemical cycle of silicon in soils: Application to a temperate forest ecosystem. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *72*(3), 741–758. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.11.010>
- Gielis, J., Temmerman, M., Delcarte, Belle, V., & Brias, V. (2005). Bamboo as a source of bioenergy. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5049.5608>
- Global Forest Resources Assessment 2020*. (2020). FAO. <https://doi.org/10.4060/ca8753en>
- Gong, H.-j., Chen, K.-m., Chen, G.-c., Wang, S.-m., & Zhang, C.-l. (2003). Effects of Silicon on Growth of Wheat Under Drought. *Journal of Plant Nutrition*, *26*(5), 1055–1063. <https://doi.org/10.1081/PLN-120020075>
- Gupta, A., & Kumar, A. (2008). Potential of Bamboo in Sustainable Development. *Asia Pacific Business Review*, *4*(3), 100–107. <https://doi.org/10.1177/097324700800400312>

- Hans Wedepohl, K. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)
- Hartley, S. E., & DeGabriel, J. L. (2016). The ecology of herbivore-induced silicon defences in grasses (J. Cooke, Ed.). *Functional Ecology*, 30(8), 1311–1322. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12706>
- Henriet, C., Bodarwé, L., Dorel, M., Draye, X., & Delvaux, B. (2008a). Leaf silicon content in banana (*Musa* spp.) reveals the weathering stage of volcanic ash soils in Guadeloupe. *Plant and Soil*, 313(1-2), 71–82. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9680-7>
- Henriet, C., De Jaeger, N., Dorel, M., Opfergelt, S., & Delvaux, B. (2008b). The reserve of weatherable primary silicates impacts the accumulation of biogenic silicon in volcanic ash soils. *Biogeochemistry*, 90(2), 209–223. <https://doi.org/10.1007/s10533-008-9245-0>
- Hodson, M., & Sangster, A. (1999). Aluminium/silicon interactions in conifers. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 76(2), 89–98. [https://doi.org/10.1016/S0162-0134\(99\)00119-1](https://doi.org/10.1016/S0162-0134(99)00119-1)
- Humborg, C., Pastuszak, M., Aigars, J., Siegmund, H., Mörth, C.-M., & Ittekkot, V. (2006). Decreased Silica Land–sea Fluxes through Damming in the Baltic Sea Catchment – Significance of Particle Trapping and Hydrological Alterations. *Biogeochemistry*, 77(2), 265–281. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-1533-3>
- Ittekkot, V., Unger, D., Humborg, C., & An, N. (2012). *The Silicon Cycle: Human Perturbations and Impacts on Aquatic Systems*. Island Press.
- Kelchner, S. A. (2013). Higher level phylogenetic relationships within the bamboos (Poaceae: Bambusoideae) based on five plastid markers. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 67(2), 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2013.02.005>
- Kovacs, N., Colinet, G., Longdoz, B., Dincher, M., Vancampenhout, K., Purwanto, B. H., Oprins, J., Peeters, M., & Meersmans, J. (2024). Assessing belowground carbon storage after converting a temperate permanent grassland into a bamboo (*Phyllostachys*) plantation. *Soil Use and Management*, 40(2), e13085. <https://doi.org/10.1111/sum.13085>
- Lal, R. (2004). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 304(5677), 1623–1627. <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lal, R., Monger, C., Nave, L., & Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1834), 20210084. <https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0084>
- Lewis, D. J., Clever, J., Meckes, C., Dart, D. E., Calla, T., Bezona, N., Bonner, J., Fox, D., Bartholomew, M., King, D., Hollenback, B., Harlow, T., Sussman, C. D., Muzos, S. J., Clark, L. G., Cortés, G., de Sousa Filgueiras, T., Londoño, X., & Wong, K. M. (2012). An updated tribal and subtribal classification of the bamboos (poaceae : Bambusoideae) bamboo phylogeny group.
- Li, Z.-j., Lin, P., He, J.-y., Yang, Z.-w., & Lin, Y.-m. (2006). Silicon’s organic pool and biological cycle in moso bamboo community of Wuyishan Biosphere Reserve. *Journal of Zhejiang University SCIENCE B*, 7(11), 849–857. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.B0849>
- Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.-G., & Christie, P. (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. *Environmental Pollution*, 147(2), 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- Liese, W., & Köhl, M. (Eds.). (2015). *Bamboo: The Plant and its Uses* (Vol. 10). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>
- Lux, A., Luxová, M., Abe, J., Morita, S., & Inanaga, S. (2003). Silicification of bamboo (*Phyllostachys heterocycla* Mitf.) root and leaf. *Plant and Soil*, 255(1), 85–91. <https://doi.org/10.1023/A:1026157424794>

- Ma, J., Miyake, Y., & Takahashi, E. (2001). Chapter 2 Silicon as a beneficial element for crop plants. In *Studies in Plant Science* (pp. 17–39, Vol. 8). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-3420\(01\)80006-9](https://doi.org/10.1016/S0928-3420(01)80006-9)
- Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002a). Functions of silicon in plant growth. In *Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan* (pp. 107–180). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044451166-9/50007-5>
- Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002b). Silicon-accumulating plants in the plant kingdom. In *Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan* (pp. 63–71). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044451166-9/50005-1>
- Ma, J. F., & Yamaji, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, *11*(8), 392–397. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2006.06.007>
- McKenzie, D., & O’Nions, R. K. (1983). Mantle reservoirs and ocean island basalts. *Nature*, *301*(5897), 229–231. <https://doi.org/10.1038/301229a0>
- Motomura, H., Mita, N., & Suzuki, M. (2002). Silica Accumulation in Long-lived Leaves of *Sasa veitchii* (Carrière) Rehder (Poaceae–Bambusoideae). *Annals of Botany*, *90*(1), 149–152. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf148>
- Nguyen, D. M., Grillet, A.-C., Bui, Q.-B., Diep, T. M. H., & Woloszyn, M. (2018). Building bio-insulation materials based on bamboo powder and bio-binders. *Construction and Building Materials*, *186*, 686–698. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.153>
- Piperno, D. R. (2002). Phytoliths. In J. P. Smol, H. J. B. Birks, W. M. Last, R. S. Bradley, & K. Alverson (Eds.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments* (pp. 235–251, Vol. 3). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/0-306-47668-1_11
- Potters, G., Brems, A., Valcke, R., Dewil, R., d’Haese, L., Samson, R., & Gielis, J. (2009). Energy crops in western europe: Is bamboo an acceptable alternative?
- Puppe, D. (2020). Review on protozoic silica and its role in silicon cycling. *Geoderma*, *365*, 114224. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114224>
- Qader, W., Mir, S. H., Meister, J., Dar, R. A., Madella, M., & Rashid, I. (2023). Sedimentological perspective on phytolith analysis in palaeoecological reconstruction. *Earth-Science Reviews*, *244*, 104549. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104549>
- Rathour, R., Kumar, H., Prasad, K., Anerao, P., Kumar, M., Kapley, A., Pandey, A., Kumar Awasthi, M., & Singh, L. (2022). Multifunctional applications of bamboo crop beyond environmental management: An Indian prospective. *Bioengineered*, *13*(4), 8893–8914. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2056689>
- Rosin, N. A., Demattê, J. A., Leite, M. C. A., De Carvalho, H. W. P., Costa, A. C., Greschuk, L. T., Curi, N., & Silva, S. H. G. (2022). The fundamental of the effects of water, organic matter, and iron forms on the pXRF information in soil analyses. *CATENA*, *210*, 105868. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105868>
- Silva, S. H. G., Ribeiro, B. T., Guerra, M. B. B., De Carvalho, H. W. P., Lopes, G., Carvalho, G. S., Guilherme, L. R. G., Resende, M., Mancini, M., Curi, N., Rafael, R. B. A., Cardelli, V., Cocco, S., Corti, G., Chakraborty, S., Li, B., & Weindorf, D. C. (2021). pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. In *Advances in Agronomy* (pp. 1–62, Vol. 167). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.12.001>
- Sommer, M., Kaczorek, D., Kuzyakov, Y., & Breuer, J. (2006). Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *169*(3), 310–329. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521981>
- Street-Perrott, F. A., & Barker, P. A. (2008). Biogenic silica: A neglected component of the coupled global continental biogeochemical cycles of carbon and silicon. *Earth Surface Processes and Landforms*, *33*(9), 1436–1457. <https://doi.org/10.1002/esp.1712>

- Struyf, E., Smis, A., Van Damme, S., Meire, P., & Conley, D. J. (2009). The Global Biogeochemical Silicon Cycle. *Silicon*, 1(4), 207–213. <https://doi.org/10.1007/s12633-010-9035-x>
- Tréguer, P., & Pondaven, P. (2000). Silica control of carbon dioxide. *Nature*, 406(6794), 358–359. <https://doi.org/10.1038/35019236>
- Tréguer, P. J., & De La Rocha, C. L. (2013). The World Ocean Silica Cycle. *Annual Review of Marine Science*, 5(1), 477–501. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172346>
- Tubana, B. S., Babu, T., & Datnoff, L. E. (2016). A Review of Silicon in Soils and Plants and Its Role in US Agriculture: History and Future Perspectives. *Soil Science*, 181(9/10), 393–411. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000179>
- Umemura, M., & Takenaka, C. (2014). Biological cycle of silicon in moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests in central Japan. *Ecological Research*, 29(3), 501–510. <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1150-5>
- Wang, X., Cheng, L., Xiong, C., Whalley, W. R., Miller, A. J., Rengel, Z., Zhang, F., & Shen, J. (2024). Understanding plant–soil interactions underpins enhanced sustainability of crop production. *Trends in Plant Science*, S1360138524001262. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.05.008>
- Xu, R., He, H., Guo, H., Zhu, F., Wang, S., Dai, C., Zheng, X., Xie, D., Li, H., Wang, C., & Zhan, H. (2023). Characteristics of silicon and phytolith distribution in bamboo (*Ferocalamus strictus*): Variations between different organs and ages. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 311, 104817. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2022.104817>

Appendices

A Stock de SiO₂ - Sol top 40 cm

kg SiO ₂ m ⁻²				
	Prairie	<i>P. nigra</i>	<i>P. aureosulcata</i>	<i>P. aurea</i>
0 - 40 cm	545.0 ± 7.6 ^a	420.4 ± 14.8 ^b	287.5 ± 8.92 ^c	409.4 ± 13.22 ^b

Table 8: Valeurs des stocks de SiO₂ total dans les 40 premiers cm dans le sol sous prairie, *P. nigra*, *P. aureosulcata* et *P. aurea*, exprimée en kgSiO₂ m⁻². Les données sont présentées sous forme de moyenne ± SD (n=3). Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre les types de végétation à p<0,05 (Tukey HSD).

B SiO₂ total dans les feuilles

% SiO ₂			
	<i>P. nigra</i>	<i>P. aureosulcata</i>	<i>P. aurea</i>
FC	0.69 ± 0.30	1.44 ± 0.39	0.96 ± 0.11
FL	2.72 ± 0.62	6.71 ± 3.98	4.09 ± 2.39

Table 9: Valeurs du SiO₂ total dans les feuilles de *P. nigra*, *P. aureosulcata* et *P. aurea*, exprimées en % de SiO₂. Les données sont présentées sous forme de moyenne ± SD (n=4 pour FC, n=3 pour FL). FC = Feuilles chaume, FL = Feuilles litière.

C SiO₂ disponible

mg SiO ₂ g ⁻¹				
	Prairie	<i>P. nigra</i>	<i>P. aureosulcata</i>	<i>P. aurea</i>
0 - 10 cm	0.035 ± 0.002 ^b	0.063 ± 0.01 ^a	0.043 ± 0.016 ^{ab}	0.038 ± 0.006 ^{ab}
10 - 20 cm	0.036 ± 0.006 ^a	0.055 ± 0.008 ^a	0.034 ± 0.003 ^a	0.047 ± 0.014 ^a
20 - 30 cm	0.036 ± 0.002 ^b	0.051 ± 0.003 ^a	0.028 ± 0.003 ^c	0.036 ± 0.003 ^b
30 - 40 cm	0.035 ± 0.004 ^b	0.045 ± 0.006 ^a	0.027 ± 0.003 ^c	0.033 ± 0.003 ^b

Table 10: Valeurs du SiO₂ disponible exprimées en mgSiO₂ g⁻¹ par profondeur dans le sol sous prairie, *P. nigra*, *P. aureosulcata* et *P. aurea*. Les données sont présentées sous forme de moyenne ± SD (n=3). Des lettres différentes indiquent, par profondeur, des différences significatives entre les types de végétation à p<0,05 (Tukey HSD).

D Comparaison méthodes

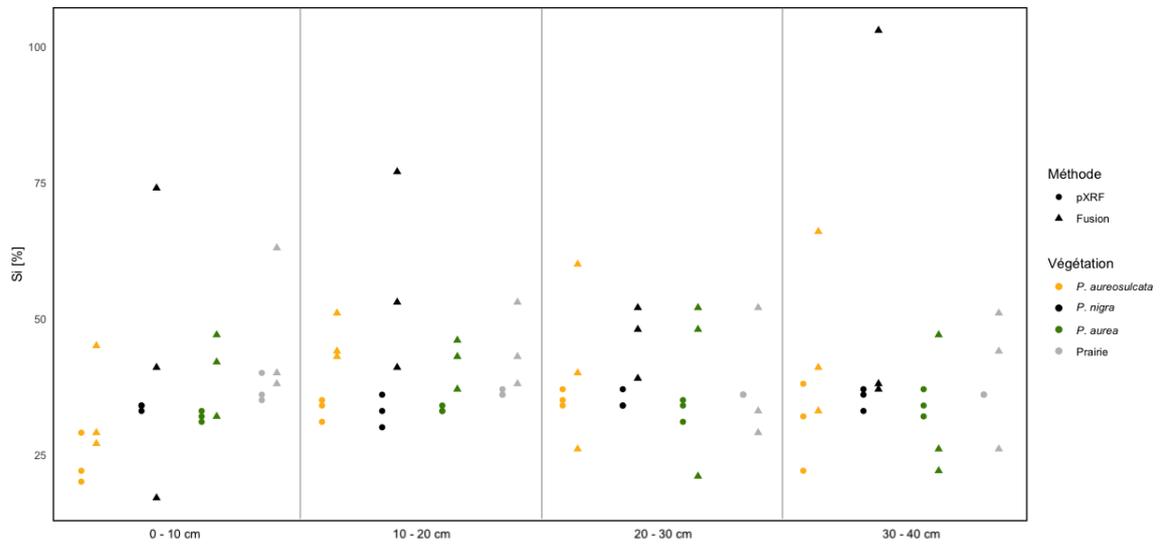


Figure 26: Comparaison entre le Si mesuré en % par fusion alcaline et par pXRF. La teneur en Si est évaluée sous prairie (gris), *P. aureosulcata* (jaune), *P. nigra* (noir) et *P. aurea* (vert).