



HAL
open science

Étude de l'impact d'une plantation d'arbres fixateurs d'azote sur la récupération des fonctions microbiennes et la reconstitution des stocks de carbone du sol après activité minière en Guyane française

Noé Le Chanoine du Manoir de Juaye

► To cite this version:

Noé Le Chanoine du Manoir de Juaye. Étude de l'impact d'une plantation d'arbres fixateurs d'azote sur la récupération des fonctions microbiennes et la reconstitution des stocks de carbone du sol après activité minière en Guyane française. Sciences de l'environnement. 2021. <dumas-04521973>

HAL Id: dumas-04521973

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04521973v1>

Submitted on 26 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0 - Attribution - Non-commercial use - No Derivative Works - International License

Mémoire de stage

présenté par

Noé LE CHANOINE DU MANOIR DE JUAYE

pour obtenir le diplôme d'

INGENIEUR AGRONOME AGROPARISTECH

Sujet :

**Étude de l'impact d'une plantation d'arbres fixateurs
d'azote sur la récupération des fonctions microbiennes et la
reconstitution des stocks de carbone du sol après activité
minière en Guyane française**

Soutenu publiquement le 29 avril 2021

à AgroParisTech,

centre de Kourou

devant le jury suivant :

Dr. Claude PLASSARD

Examinatrice

Ing. Johan LITAUDON

Tuteur de stage

Dr. Raphaël MANLAY

Enseignant-référent AgroParisTech

Dr. Stéphane TRAISSAC

Enseignant-référent AgroParisTech



L'établissement AgroParisTech diffuse ce mémoire et se dégage de toute responsabilité sur le contenu proposé.

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition.

L'obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document doit être respectée selon la licence Creative Commons apposée

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation "Paternité – Pas d'utilisation commerciale – Pas de modification 4.0 France disponible en ligne : <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



REMERCIEMENTS

Je remercie Jean-Christophe Roggy d'avoir permis le montage du projet, la création de ce stage, de m'avoir encadré et pour ses nombreuses aides.

Je remercie Johan Litaudon, mon tuteur de stage, pour ses conseils, sa patience et sa bonne humeur qui m'auront permis de passer un stage agréable et joyeux.

Je remercie Stéphane Traissac et Raphaël Manlay, mes enseignants référents, d'avoir encadré ce stage et de m'avoir conseillé tant sur le fond que sur la forme. Je remercie aussi Claude Plassard d'avoir accepté le rôle d'examinatrice pour ce travail.

Je remercie Méline Aubry-Kientz, Pierre Gloaguen et Guillaume Salzet pour leur aide tout au long de mes analyses statistiques et qui m'aura permis d'apprécier cette étape.

Je remercie Alexandre Cailleau et Axel Fort de la SMSE pour l'accueil de qualité sur la mine et pour la mise à disposition de tous les éléments nécessaires au bon déroulement du terrain.

Je remercie Nicolas Coulin, Lando Amiamba et Anthony King Esron de Solicaz pour leur aide et leur bonne humeur qui auront participé à ce que le terrain soit un très bon moment.

Je remercie Anabelle Filatre pour la relecture de la bibliographie et ses conseils sur la mise en forme de celle-ci.

Je remercie toute l'équipe EcoFoG pour la bonne entente qui règne et qui fait que travailler et habiter sur le campus agronomique de Kourou était un réel plaisir.

Je remercie Myriam du Manoir pour la relecture attentive de ce rapport.

RÉSUMÉ

Ce travail, conduit en Guyane Française, étudie l'impact, après huit années, d'une plantation d'arbres fixateurs d'azote sur la récupération des fonctions microbiennes et la reconstitution des stocks de carbone du sol en contexte minier.

Trois modalités ont été étudiées : une zone minière non revégétalisée, une zone minière revégétalisée et une zone de forêt de référence non perturbée. Différents paramètres physiques, chimiques et biologiques ont été étudiés.

Les résultats montrent que les sols de plantations après 8 ans présentent des biomasses microbiennes proches de celle de la forêt de référence mais différent en termes de structures de la communauté totale. Nous observons également une meilleure efficacité d'utilisation du carbone du sol qu'en forêt, ce qui pourrait conduire à long terme à un stockage plus durable du carbone dans le sol.

Les stocks de carbone et d'azote du sol obtenus sous la plantation sont intermédiaires entre ceux de la parcelle non revégétalisée et ceux de la parcelle forestière. Les biais liés au choix de la référence en termes de stock de carbone ont été limités au maximum mais n'ont pas pu être éliminés.

La modélisation de l'évolution des stocks de carbone effectuée avec le modèle RothC montre que dans une centaine d'années les stocks de carbone des parcelles revégétalisées pourraient atteindre ceux de la forêt.

ABSTRACT

This study, conducted in French Guiana, investigates the impact, after eight years, of a nitrogen-fixing tree plantation on the recovery of microbial functions and the reconstitution of soil carbon stocks in a mining context.

Three modalities were studied: a non-vegetated mining area, a revegetated mining area and an undisturbed reference forest area. Different physical, chemical and biological parameters were studied.

The results show that the plantation soils after 8 years have microbial biomasses close to that of the reference forest but differ in terms of total community structure. We also observe a better soil carbon use efficiency than in the forest, which could lead to a more sustainable soil carbon storage in the long term.

Soil carbon and nitrogen stocks obtained under the plantation are intermediate between those of the non-vegetated plot and those of the forest plot. Biases related to the choice of carbon stock reference were kept to a minimum but could not be eliminated.

Modelling of the evolution of carbon stocks with the RothC model shows that in about 100 years the carbon stocks of the revegetated plots could reach those of the forest.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	1
RÉSUMÉ	2
ABSTRACT	2
TABLE DES MATIÈRES	3
1. INTRODUCTION	7
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	11
2.1. Site d'étude	11
2.2. Acquisition des données	12
2.2.1. Prélèvements des échantillons de sol	13
2.2.2. Analyses réalisées sur les échantillons de sol	14
2.2.2.1 Analyses physico-chimiques	14
2.2.2.2 Analyses d'activités microbiennes.....	14
2.3. Traitement des données	15
2.3.1. Construction d'indicateurs d'activités microbiennes	15
2.3.1.1 La biomasse microbienne active du sol.....	15
2.3.1.2 Le ratio DEA-SIR	15
2.3.1.3 Le quotient respiratoire journalier.....	16
2.3.1.4 Le quotient microbien.....	16
2.3.1.5 Le taux de minéralisation global.....	16
2.3.1.6 Bilan de l'évolution attendue des indicateurs.....	17
2.3.2. Constitution des stocks de C et N	17
2.3.2.1 Constitution des stocks de C et N sur un mètre	17
2.3.2.2 Constitution des stocks de C et N corrigés par horizon	17
2.3.3. Construction du modèle RothC	18
2.3.3.1 Initialisation du modèle	19
2.3.3.2 Estimation des apports de carbone sur la parcelle plantée	19
2.4. Analyse des données	20
2.4.1. Analyse des données d'activité.....	20
2.4.2. Analyse des données des stocks de carbone et d'azote	20
2.4.3. Exécution du modèle RothC.....	20
3. RÉSULTATS	21

3.1. Indicateurs d'activités microbiennes	21
3.1.1. La biomasse microbienne active du sol	21
3.1.2. Le ratio DEA/SIR	22
3.1.3. Le quotient respiratoire journalier	22
3.1.4. Le quotient microbien	23
3.1.5. Le taux de minéralisation global	23
3.2. Stocks de carbone et d'azote	24
3.2.1. Stocks de carbone et d'azote bruts sur un mètre	24
3.2.2. Stocks de carbone et d'azote corrigés par horizon	25
3.2.2.1 Évolution de la masse de terre fine de référence	25
3.2.2.2 Évolution des teneurs en carbone et en azote	25
3.2.2.3 Stocks de carbone corrigés et ajustés	26
3.2.2.4 Stocks d'azote corrigés et ajustés	27
3.3. Évolution des stocks de carbone avec RothC	27
3.3.1. Initialisation du modèle	28
3.3.2. Estimation des apports de carbone sur la parcelle plantée	28
3.3.3. Évolution du stock de carbone sur la parcelle plantée	29
4. DISCUSSION	31
4.1. Indicateurs d'activités microbiennes	31
4.1.1. L'ingénierie écologique a permis de récupérer une partie des fonctions du sol	31
4.1.2. Les micro-organismes du sol de la plantation semblent avoir une meilleure efficacité d'utilisation du carbone	31
4.1.3. Cette meilleure efficacité de la communauté microbienne semble être due à la meilleure qualité des litières de la plantation	31
4.2. Stocks de carbone et d'azote	32
4.2.1. Les stocks bruts mesurés sont dans la moyenne et ne permettent pas de conclure sur l'effet de la plantation	32
4.2.2. Les stocks corrigés ajustés montrent que les stocks sous la plantation sont intermédiaires	32
4.2.3. Les corrections appliquées rendent difficile la comparaison avec la littérature, la prise en compte de la masse d'argile pourrait résoudre ce problème	33
4.3. Évolution du stock de carbone avec le modèle RothC	33
4.3.1. L'initialisation de stocks de carbone conditionne la durée nécessaire à la reconstitution de ces stocks	33
4.3.2. Sous certaines conditions, les stocks sous la plantation pourraient dépasser ceux de la forêt	34
5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	35
6. RÉFÉRENCES	36
7. LISTE DES ABRÉVIATIONS	41

8. TABLE DES TABLEAUX	42
9. TABLE DES FIGURES	43
10. TABLE DES ÉQUATIONS.....	45
11. ANNEXES.....	46
Table des Annexes	46
Annexe 1 : Molécules de matière organique et réservoirs associés	47
Annexe 2 : <i>Priming effect</i>	48
Annexe 3 : Localisation des parcelles étudiées	49
Annexe 4 : Structure diamétrique des parcelles plantées	50
Annexe 5 : Triangle de texture avec la position des parcelles étudiées	51
Annexe 6 : Protocole de carottage et conditionnement des échantillons	52
Annexe 7 : Respirations potentielle et semi-potentielle	53
Annexe 8 : Dénitrification potentielle	54
Annexe 9 : Méthodologie de la correction massique	55
Annexe 10 : Script R utilisé pour la correction massique	60
Annexe 11 : Présentation du modèle RothC et initialisation	61
Annexe 12 : Présentation du dispositif pour estimer les apports de carbone sur la parcelle plantée	64
Annexe 13 : Résumé des données brutes utilisées	66
Annexe 14 : Fonction R utilisée pour la comparaison des moyennes des activités microbiennes (modèle linéaire mixte)	70
Annexe 15 : Fonction R utilisée pour la comparaison des stocks ajustés (modèle linéaire à deux variables)	71
Annexe 16 : Script R utilisé pour modéliser l'évolution des stocks de carbone avec RothC	72
Annexe 17 : Données utilisées pour les différentes figures	73
Annexe 18 : Évolution type des caractéristiques des couches successives de sol	75
Annexe 19 : Texture non corrigée et corrigée par type et par horizon	76
Annexe 20 : Tableau utilisé pour l'étude des ajustements possibles pour les stocks	78
Annexe 21 : Stocks de carbone par horizon, corrigés et ajustés	79
Annexe 22 : Comparaison des stocks de carbone en fonction des corrections effectuées	80
Annexe 23 : Stocks d'azote par horizon, corrigés et ajustés	82

1. INTRODUCTION

La COP21 (Conférence des Parties) de Paris sur le climat de 2015, a réaffirmé la volonté des états membres de contenir l'augmentation de la température moyenne à la surface de la terre en dessous des 2°C à l'horizon 2100 (réchauffement climatique) et, dans l'idéal, de la limiter à 1,5°C (Gouvernement Français, 2017).

C'est dans ce contexte de la COP 21 qu'a été lancée l'« Initiative Internationale - 4 pour 1000 » par le gouvernement français (Initiative « 4 pour 1000 », 2021). Cette initiative vise à accroître la teneur en matière organique des sols et la séquestration de Carbone (C), comme moyen de lutte contre le réchauffement climatique, par la mise en œuvre de pratiques agricoles adaptées. Elle part d'un constat simple : une augmentation de 4‰ du stock de C présent dans les sols sur les 30-40 premiers centimètres, compenserait l'ensemble des émissions anthropogéniques générées par an (Minasny *et al.*, 2017). Cette initiative a reçu de nombreuses critiques et suscite encore aujourd'hui le scepticisme d'une partie de la communauté scientifique, certains lui reprochant même de décrédibiliser les disciplines des sciences du sol. Dans tous les cas, cette initiative s'est révélée mobilisatrice dans un climat de controverses scientifiques dans lequel l'importance du C du sol semble faire aujourd'hui l'unanimité.

L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) définit le sol comme : « un corps naturel comprenant des couches (horizons) qui sont composées de matériaux altérés de minéraux, de matière organique, d'air et d'eau. Le sol est le produit final de l'effet combiné du climat, de la topographie, des organismes (flore, faune et êtres humains) sur les matériaux de bases (roches et minéraux d'origine), au fil du temps » (FAO, 2021).

Les matériaux altérés de minéraux sont classés selon leur taille (granulométrie, Figure 1) et leur proportion définie la texture du sol, caractérisée par un triangle de texture. Trois catégories principales (argiles, limons, sables) sont distinguées.

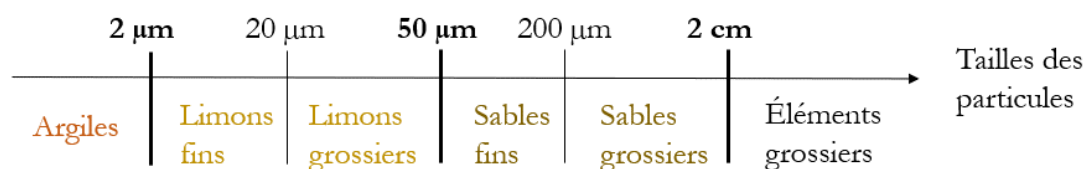


Figure 1 : Limites utilisées le plus souvent en France pour les classes granulométriques des matériaux altérés de minéraux (de Forges *et al.*, 2008)

Ces éléments minéraux peuvent contenir du C, notamment sous forme de carbonate de calcium, qui est alors qualifié d'inorganique.

La Matière Organique (MO) du sol est composée d'organismes vivants et de débris morts (Figure 2).

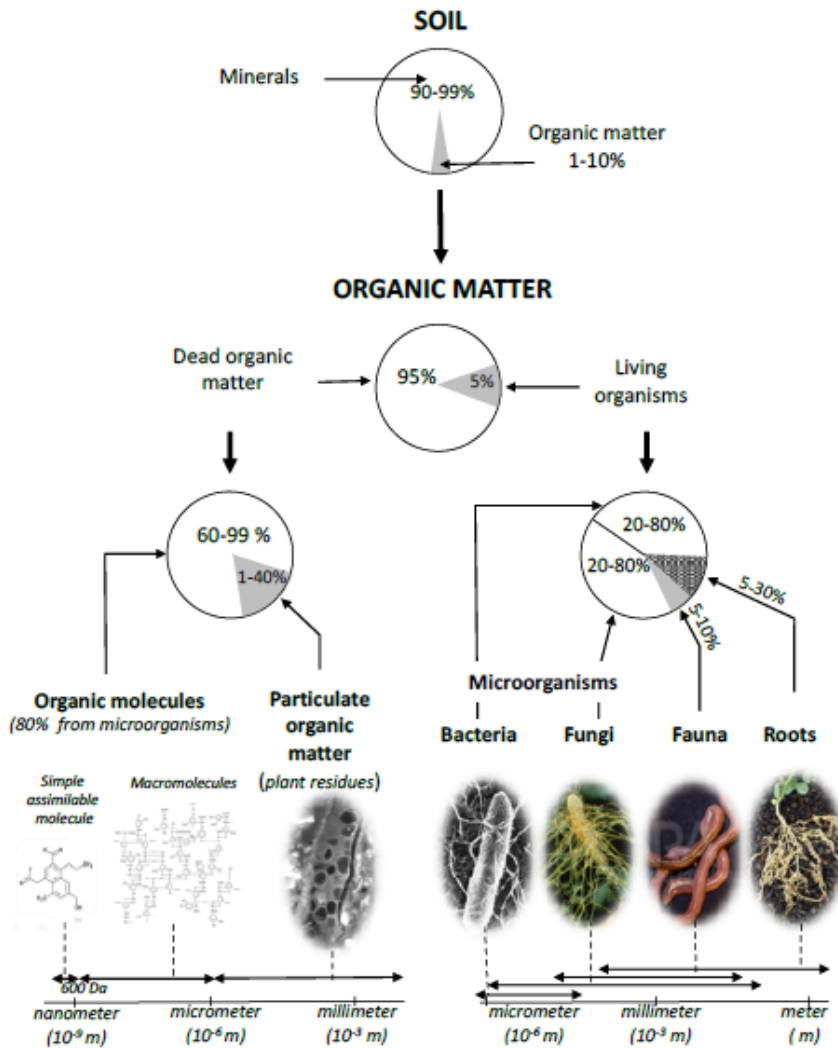


Figure 2 : Types de matière organique présents dans le sol (Basile-Doelsch et al., 2020)

Elle est composée d'environ 50% de C. Les producteurs primaires des écosystèmes, principalement les végétaux, produisent des molécules carbonées en fixant le CO₂ atmosphérique (à l'aide de la photosynthèse) qui sont intégrées dans leurs tissus ou consommées par ceux-ci pour leur fonctionnement métabolique. Lorsque cette MO se retrouve dans le sol elle sert ensuite de ressource trophique aux organismes du sol.

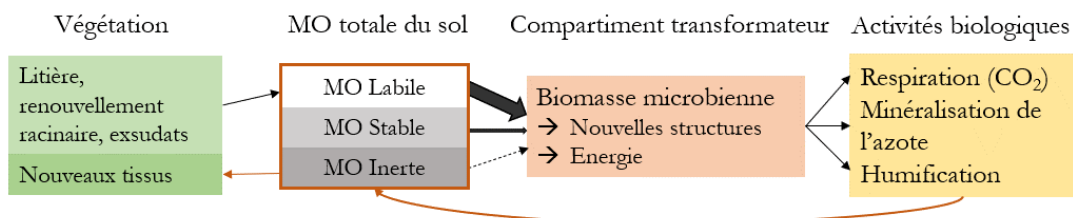


Figure 3 : Cycle du carbone dans le sol

La décomposition, des feuilles et des racines mortes, et les exsudats racinaires sont la source majeure de MO et donc de C des sols (Figure 3). La dégradation de cette MO est

principalement faite par les Micro-Organismes du Sol (MiOS) et permet le recyclage des nutriments (Paterson *et al.*, 2009). Au cours de cette dégradation, une partie du C est perdue sous forme de CO₂, une partie est intégrée à la biomasse des MiOS et le reste est libéré sous forme de nouvelles molécules de MO. Ces nouvelles molécules seront à leur tour recyclées par les MiOS. C'est le cycle du C.

Le temps de résidence du C dans le sol dépend de la molécule/structure dans laquelle il est contenu. Il est possible de définir plusieurs réservoirs de MO dans le sol, chacun contenant des molécules aux propriétés différentes et donc avec une période de turnover différente (Annexe 1, p.47). Les périodes de turnover dépendent fortement de la température et de l'humidité, paramètres influant directement sur l'activité des MiOS (Krull *et al.*, 2003).

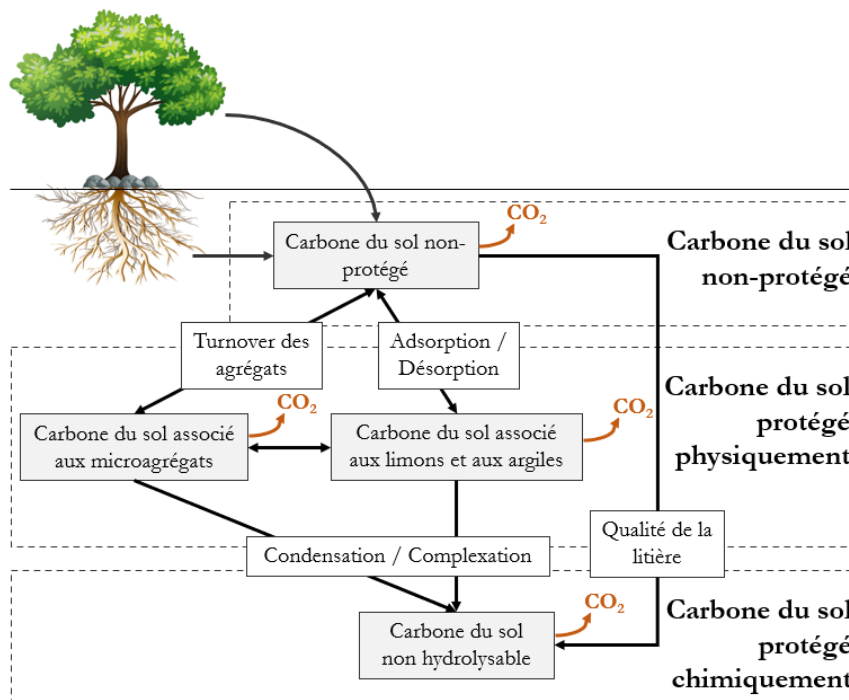


Figure 4 : Les différentes voies de protection de la matière organique du sol (adaptée de Six *et al.*, 2002)

Il y a deux principaux types de protection de la MO (Figure 4). La protection peut être physique, la MO est alors isolée des enzymes des décomposeurs, de l'oxygène et de l'eau ou encore trop fortement liées pour être mobilisée par les MiOS. La protection peut aussi être chimique, la MO devient de moins en moins dégradables par les MiOS (Six *et al.*, 2002).

La quantité de C finalement stabilisée dans le sol dépendrait donc à la fois de la protection de la MO et de l'efficacité avec laquelle la communauté des décomposeurs convertirait le C en biomasse, par rapport à la quantité de C dégagée par respiration (CO₂). On sait en effet aujourd'hui qu'une proportion importante du C des sols provient de composés organiques métabolisés par les microorganismes et stabilisés sous forme de résidus microbiens dans les associations organo-minérales (Derrien *et al.*, 2016). De plus, la capacité des sols à séquestrer le C est également liée à leurs teneurs en azote et, en particulier, à celles des apports de litières aériennes et souterraines. En effet, de fortes teneurs en azote dans les litières (comme chez les plantes fixatrices de N₂) stimulent l'activité microbienne permettant ainsi l'accumulation de résidus microbiens dans le sol. Cela induit en plus une inhibition de la dégradation des lignines et une protection de celles-ci, augmentant la période de turnover de ces molécules (Derrien *et al.*, 2016). Néanmoins l'apport de ce type

de composés labiles (MO fraîche), facilement utilisables par les MiOS décomposeurs, peut également stimuler la dégradation des MO préexistantes dans le sol (MO stable) et induire ainsi un déstockage du C. C'est le *priming effect* (Annexe 2, p. 48).

En milieu tropical, il y a colimitation par l'azote et le phosphore de la productivité primaire (Elser *et al.*, 2007). Le phosphore étant d'origine minérale, les plantes ne sont pas capables de le prélever dans un réservoir autre que le sol. L'azote, en revanche, peut être extrait de l'atmosphère (présent sous forme de diazote N₂). Une partie des plantes de la famille des Fabacées ont la capacité d'établir une symbiose avec des bactéries de la famille des Rhizobiacées. Ces bactéries, en échange d'un habitat et d'énergie, transforment l'azote atmosphérique en NH₃ assimilable par les plantes et les rendent ainsi autonomes vis-à-vis de l'azote. Cette symbiose, modulée par les plantes en fonction de la disponibilité en azote dans son substrat (Voisin *et al.*, 2015), leur confère la capacité à croître sur des sols dont les réserves en azote et en autres éléments sont particulièrement limitées. Par la retombée de leur litière, elles permettent d'augmenter la teneur en azote assimilable du sol (Binkley et Giardina, 1998) et donc d'améliorer la décomposition de la MO par les MiOS.

Dans le contexte de l'initiative 4 pour 1000 le projet Carbiosol, porté par l'Unité Mixte de Recherche Écologie des Forêts Tropicales en Guyane française et financé par AgroParisTech Innovation (fonds européens FEDER), étudie l'impact de revégétalisations de Fabacées sur le stock de C dans les sols et sur les MiOS. Ces revégétalisations ont été faites dans deux contextes : en contexte agroforestier dans un but de production de biomasse pour la filière biomasse énergie et en contexte minier pour les revégétalisations dans le cadre réglementaire en fin d'exploitation. Ces plantations ont été faites par Solicaz qui est une entreprise guyanaise spécialisée en ingénierie écologique et agroécologique dont le fer de lance est la production de plantes de services fixatrices d'azote, Fabacées arborées nodulées et mycorhizées.

Ce stage s'inscrit dans le projet Carbiosol, sur la plus grosse partie de la phase de terrain et sur l'analyse des résultats issus des terrains miniers. La problématique à laquelle nous tenterons de répondre est la suivante : « Quel est l'impact d'une plantation d'arbres fixateurs d'azote sur les activités microbiennes et sur le stockage de C dans les sols en Guyane française dans un contexte de revégétalisation sur site minier ? ».

Plusieurs objectifs à atteindre découlent de cette problématique :

- Étudier l'impact de la plantation sur les activités des micro-organismes du sol.
- Étudier l'impact de la plantation sur les stocks de C et d'azote du sol.
- Étudier l'évolution des stocks de C dans le temps.

Tout d'abord, nous nous attendons à observer des communautés microbiennes en cours de reconstitution, tant sur la taille que sur la diversité. Nous pouvons imaginer que la litière des fixateurs d'azote permette un fonctionnement plus optimal des MiOS ce qui se traduirait directement sur les indicateurs microbiens.

Nous nous attendons aussi à mesurer une augmentation des stocks de C et d'azote sous la plantation depuis le début de celle-ci.

Enfin, nous pouvons penser qu'à long terme les stocks de C dans le sol de la plantation se seront reconstitués.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. SITE D'ÉTUDE

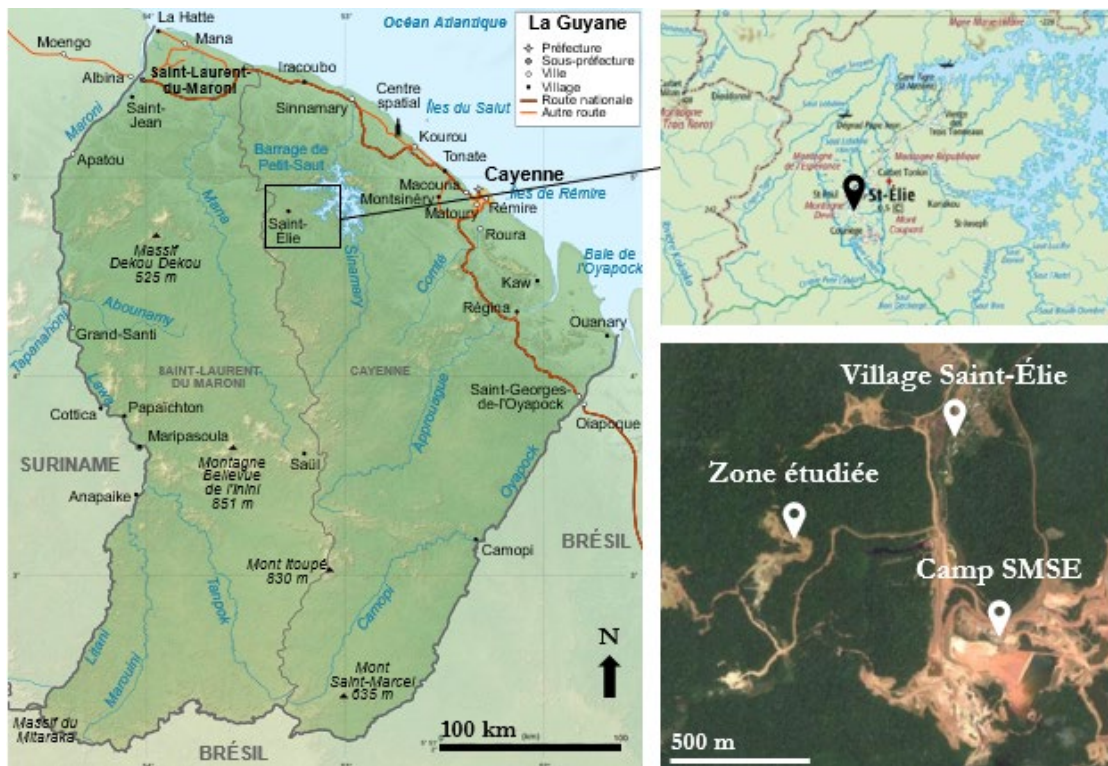


Figure 5 : Position du site d'étude et de son contexte (géoportail.fr, googlemaps.fr)

La Guyane française se situe sur le continent Sud-américain, entre le Suriname à l'Ouest et le Brésil au Sud et à l'Est. Le climat en Guyane française est équatorial humide. La moyenne des températures, qui fluctuent peu au cours de l'année, est de 26°C. Les précipitations vont progressivement de 1700 mm à Mana à 3700 mm au Sud-Est de Cayenne, suivant la côte. Il pleut plus sur la bande côtière que dans les terres (Fujisaki, 2014).

Notre site d'étude se situe à Saint-Élie sur la concession de la Société des Mines de Saint-Élie (Figure 5). Sa position GPS est 04°49'11.02"N, 53°17'53.98"W.

Les parcelles sont situées sur des zones terrassées où le sol a été fortement remanié suite à l'exploitation d'or alluvionnaire (il y a notamment des gros blocs de quartz présents en profondeur). Cette activité induit une perturbation importante du sol, avec notamment la suppression de son organisation verticale. Nous avons étudié trois types de parcelles, très proche géographiquement : une parcelle de forêt non dégradée de référence (« parcelle forêt »), une parcelle réhabilitée mais non revégétalisée (« parcelle témoin ») et trois parcelles revégétalisées (carte Annexe 3, p. 49). Les trois parcelles revégétalisées sont étudiées comme une seule grande parcelle (« parcelle plantée ») car elles sont assez différentes d'un point de vue couvert arboré (variation de la taille et du diamètre des arbres, Annexe 4, p. 50) et d'un point de vue engorgement (proximité de cours d'eau). Leur étude conjointe permet donc de rendre compte de la variabilité au sein de la plantation. L'étude a donc porté sur trois types de parcelle : témoin, plantée et forêt.

L'étude des communautés microbiennes impose que la forêt de référence soit à proximité des parcelles plantées (ces communautés sont très variables spatialement) alors que les

études de stocks imposent que la référence ait un sol et une situation topographique et hydrologique proche de celles des parcelles plantées. L'ensemble du vallon ayant été exploité, nous avons dû choisir une forêt en périphérie de celui-ci, à environ 10 mètres au-dessus du niveau des parcelles plantées et à environ 100 mètres de celles-ci. Les régimes hydriques et les sols sont donc probablement un peu différents entre la forêt de référence et les parcelles plantées. Ce biais est induit par la volonté de vouloir combiner plusieurs approches dans cette étude.

En 2012, la revégétalisation a été faite par Solicaz avec des plants d'*Inga edulis* Mart. à une densité de 1200 plants par hectare. Ces plants sont inoculés et mycorhizés au préalable.

Inga edulis est un arbre de la famille des Fabacées. C'est un arbre fixateur d'azote par symbiose avec des bactéries du genre *Bradyrhizobium* Jordan. Il est utilisé dans les fermes en Amérique du Sud car il pousse bien sur sol acide, il produit des fruits comestibles et peut servir de pare-soleil et de bois de feu (Leblanc *et al.*, 2007).

Les *I. edulis* présents sur la parcelle font maintenant plus de 15 mètres et une végétation spontanée est apparue en sous-bois.

L'étude de ces trois types de parcelle nous permet d'obtenir le stock de C présent dans le sol avant la plantation des *I. edulis* (parcelle laissée nue) et après la plantation (parcelles plantées) et d'avoir la comparaison entre le stock de C dans le sol sous forêt non perturbée et sous la plantation d'*I. edulis*. Idéalement il aurait fallu faire un prélèvement avant plantation mais, vu la non végétalisation de la parcelle témoin, nous supposons que son état est proche de celui avant plantation.

Tableau 1 : Texture des parcelles étudiées

Parcelle	Texture (Nomenclature USDA)
Plantée	Limons argileux
Témoin	Limons argileux
Forêt	Argiles

Les parcelles plantée et témoin ont une granulométrie plus grossière que la parcelle forêt (Tableau 1 et Annexe 5, p.51). Cela peut être dû à la texture des horizons plus profonds qui ont pu être remontés au cours de l'activité d'orpillage alluvionnaire.

2.2. ACQUISITION DES DONNÉES

Le choix a été fait de procéder selon la même méthode que Stahl *et al.* (2016) dans le cadre du projet CARPAG mené en Guyane pour étudier le stock de C dans le premier mètre de sol sous prairies. Le matériel utilisé dans ce travail est à disposition de notre étude. Il permet de prélever une carotte d'un mètre de sol sans trop perturber la structure de celui-ci.

2.2.1. PRÉLÈVEMENTS DES ÉCHANTILLONS DE SOL

Nous avons donc réalisé une série de prélèvements d'un mètre de sol à l'aide d'une tarière thermique à percussion (modèle Cobra TT – Eijkelkamp, The Netherlands).



Figure 6 : Photo du marteau piqueur monté sur la gouge à gauche, photo du système d'extraction de la gouge à droite (photos personnelles)

C'est un marteau piqueur monté sur une gouge cylindrique d'un mètre de haut pour 6,5 centimètres de diamètre (Figure 6 à gauche).



Figure 7 : Photo d'une carotte extraite de la parcelle forêt (photo personnelle).

Pour chaque carotte nous avons coupé le prélèvement en trois horizons (zéro étant la surface du sol, Figure 7) :

- 0-20 centimètres (horizon 1)
- 20-50 centimètres (horizon 2)
- 50-100 centimètres (horizon 3)

Ces limites sont les mêmes que Stahl *et al.* (2016). Cela permettra une comparaison avec les valeurs obtenues dans ce travail pour une autre partie du projet (étude de l'impact de la plantation dans un contexte agro-forestier). Descendre à cette profondeur permet d'étudier l'ensemble du sol prospecté par la végétation (Schenk et Jackson, 2002). Le protocole de prélèvement est détaillé en Annexe 6, page 52.

Chaque horizon a été séché pendant au moins 48 heures à l'air libre au plus tard 12 heures après les prélèvements puis tamisés avec un tamis à deux millimètres pour séparer la fraction fine de la fraction grossière. Les prélèvements de fractions fines pour l'analyse des activités du sol ont été faits à cette étape. Les deux fractions ont ensuite été séchées pendant 48 heures à 70 °C à l'étuve. À l'issue de ce séchage les deux fractions ont reçu des analyses complémentaires.

2.2.2. ANALYSES RÉALISÉES SUR LES ÉCHANTILLONS DE SOL

Pour limiter le coût des analyses des composites ont été réalisés pour la parcelle forestière (composites de deux carottes). Les composites ont été formés en prélevant une partie de chaque horizon à mélanger en respectant les rapports massiques entre chaque horizon. Cette méthodologie a été appliquée par Stahl *et al.* (2016).

2.2.2.1 Analyses physico-chimiques

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées par Celestalab à Montpellier.

Pour ces analyses, les sols ont été tamisés à 2 mm puis broyés à 200 μm . Pour chaque horizon ont été mesurés :

- Le C total par combustion sèche à 550°C (méthode adaptée de DIN19539)
- L'N total par combustion sèche à 550°C (méthode adaptée de DIN19539)
- La granulométrie (sables, limons, argiles) par tamisage à l'eau et sédimentation

L'objectif premier de ces analyses est de pouvoir obtenir les stocks de C et d'azote sur le premier mètre de sol et sur les trois horizons étudiés.

2.2.2.2 Analyses d'activités microbiennes

Les activités microbiennes retenues rendent compte du fonctionnement global du sol. Ces processus microbiens jouent un rôle majeur dans le recyclage de la MO et donc dans les cycles du C et de l'azote dans le sol. De plus, par la rapidité d'adaptation et de réaction aux changements des microorganismes, les mesures de ces activités rendent compte, avant tout autre indicateur, des modifications de l'état d'un sol. Elles sont choisies selon cinq types de critères (Schimann *et al.* 2012):

- Pour l'importance écologique des flux générés (CO_2 et N_2O notamment),
- Pour leur représentativité par rapport à l'ensemble de la communauté microbienne du sol,
- Pour l'importance des facteurs environnementaux sur la régulation de leur niveau de fonctionnement (contrôle environnemental),
- Pour leur différence de sensibilité à ces facteurs environnementaux,
- Pour leur accessibilité technique à leur mesure.

La respiration microbienne du sol concerne l'ensemble des micro-organismes dans leur diversité et abondance (champignons, bactéries dénitrifiantes et nitrifiantes inclus).

La dénitrification est la biotransformation qui permet la conversion du nitrate (NO_3) en oxyde nitreux (N_2O). C'est un processus respiratoire facultatif se produisant en conditions d'anaérobiose. La dénitrification est portée par une communauté microbienne très diversifiée et représente environ 20% de la communauté totale des hétérotrophes du sol.

Du fait de différences d'abondance et de diversité entre les communautés qui les portent, ces deux fonctions sont particulièrement intéressantes pour évaluer l'impact de perturbations et prédire les évolutions futures de l'écosystème sol.

Trois types d'activités microbiennes ont été mesurées : la respiration basale et potentielle (protocole en Annexe 7, p.53, méthode proposée par Beare *et al.*, (1991)) et la dénitrification potentielle (protocole en Annexe 8, p.54, méthode utilisée par Parry *et al.*

(2000)). Ces trois types d'activités sont ensuite utilisés pour la construction des bioindicateurs microbiens du fonctionnement biologique des sols.

Il est important de comparer des forêts de référence géographiquement proches des parcelles étudiées car les indicateurs d'activités varient significativement d'un type de forêt à un autre (Schimann *et al.*, 2012).

2.3. TRAITEMENT DES DONNÉES

2.3.1. CONSTRUCTION D'INDICATEURS D'ACTIVITÉS MICROBIENNES

2.3.1.1 La biomasse microbienne active du sol

L'activité respiratoire potentielle (SIR en anglais) permet d'obtenir la quantité de MiOS vivants présents dans le sol (Anderson et Domsch, 1978).

Équation 1 : La masse de carbone contenu dans les micro-organismes en fonction de la respiration potentielle (d'après Anderson et Domsch., 1978)

$$MBC = 40.04 * SIR + 0,37 \quad R^2 = 0,96$$

MBC : masse de C contenue dans les microorganismes vivants du sol (en µg de C-biomasse.g⁻¹ de sol)

SIR : activité respiratoire potentielle du sol (en µL de CO₂.g⁻¹ de sol.h⁻¹).

Anderson et Domsch (1978) utilisent la MBC (Équation 1) pour estimer la colonisation du sol par les MiOS (utilisée en contexte tropical par Couic *et al.* (2018)).

2.3.1.2 Le ratio DEA-SIR

Ce ratio, mesuré en conditions potentielle, est un indicateur de la proportion de dénitrifiants au sein de la communauté microbienne totale du sol (Michalet *et al.*, 2013) et un proxy de la diversité microbienne du sol (Philippot *et al.*, 2013). Il est corrigé par un facteur lié à la stœchiométrie des réactions aérobies et anaérobies de dégradation du glucose suivant l'Équation 2.

Équation 2 : Ratio DEA-SIR corrigé

$$Ratio\ DEA - SIR\ cor = \frac{DEA}{SIR} \times \frac{DEA}{CO_2\ prod}$$

Ratio DEA-SIR cor : ratio DEA-SIR corrigé (sans dimension)

DEA : dénitrification potentielle (en µg de N-N₂O. g⁻¹ de sol.h⁻¹)

SIR : activité respiratoire potentielle (en µg de C-CO₂.g⁻¹ de sol.h⁻¹)

CO₂ prod : quantité de CO₂ produite pendant la dénitrification (en µg de C-CO₂. g⁻¹ de sol.h⁻¹)

2.3.1.3 Le quotient respiratoire journalier

Le quotient respiratoire journalier traduit la capacité des MiOS à intégrer le C de la MO dans leur biomasse. Plus celui-ci est fort, plus la quantité de substrat relâché sous forme de CO₂ est importante et moins la proportion de MO intégrée dans la biomasse microbienne est grande (Groupe de travail « Biologie du sol - application » (BSA), 2009). Il s'obtient suivant l'Équation 3.

Équation 3 : le quotient respiratoire journalier (d'après Ouedraogo et al., (2017))

$$qCO_2 = \frac{Respi_{basale} \times 24[heure]}{MBC}$$

qCO_2 : quotient respiratoire journalier (en mg de C-CO₂.g⁻¹ de C-biomasse)

$Respi_{basale}$: respiration basale (en µg de C-CO₂.g⁻¹ de sol.h⁻¹)

2.3.1.4 Le quotient microbien

Le quotient microbien est le rapport entre le C contenu dans la biomasse microbienne et le C contenu dans le sol. Il informe sur la disponibilité du C du sol pour permettre d'entretenir et d'augmenter la biomasse des MiOS (Groupe de travail « Biologie du sol - application » (BSA), 2009). Il s'obtient suivant l'Équation 4.

Équation 4 : Le quotient microbien (d'après Rui *et al.* (2016))

$$QM = \frac{MBC}{1000 \times Teneur\ en\ C} \times 100$$

QM : quotient microbien (en %).

L'analyse conjointe du quotient respiratoire et du quotient microbien permet d'explorer l'Efficiencia microbienne d'Utilisation du Carbone (CUE)(Blagodatskaya *et al.*, 2014) qui définit comment les décomposeurs équilibrent les réactions anaboliques et cataboliques du C. Une faible CUE implique des pertes de C relativement importantes (par respiration) et moins de C converti en biomasse, réduisant finalement le potentiel de séquestration à long terme du C dans les sols.

2.3.1.5 Le taux de minéralisation global

Le taux de minéralisation global est un indicateur de la vitesse de minéralisation de la MO par les MiOS et donc de sa qualité (Ouedraogo *et al.*, 2017). Il s'obtient suivant l'Équation 5.

Équation 5 : Le taux de minéralisation globale (adapté de Ouedraogo et al. (2017))

$$TMG = \frac{Respi_{basale}}{1000 \times Teneur\ en\ C} \times 100$$

TMG : taux de minéralisation global (pourcents.h⁻¹)

$Teneur\ en\ C$: teneur en C du sol (en mg de C.g⁻¹ de sol).

2.3.1.6 Bilan de l'évolution attendue des indicateurs

Tableau 2 : Évolution attendue des indicateurs entre les types de parcelle

Indicateurs	Témoin	Plantée	Forêt
MBC	-	=	+
DEA/SIR	-	=	+
qCO ₂	+	-	=
QM	-	+	=
TMG	-	+	=

Le Tableau 2 résume l'évolution attendue pour les indicateurs étudiés.

2.3.2. CONSTITUTION DES STOCKS DE C ET N

2.3.2.1 Constitution des stocks de C et N sur un mètre

Pour calculer la quantité de C par unité de surface nous avons utilisé l'Équation 6. Par extension, nous avons appliqué cette formule pour les stocks d'azote.

Équation 6 : Stock de carbone par horizon (adaptée de Poeplau et al., 2017)

$$Stock\ de\ C_{hi} = \frac{H_{hi}}{V_{hi}} (m_{TF,hi} \times C_{C,TF,hi} + m_{EG,hi} \times C_{C,EG,hi})$$

Stock de C_{hi} : stock de C dans l'horizon i (en kg.m⁻²)

H_{hi} : hauteur de l'horizon i (en m)

V_{hi} : volume de l'horizon i (en m³)

m_{TF,hi} : masse de terre fine dans l'horizon i (en kg)

C_{C,TF,hi} : teneur en C dans la terre fine de l'horizon i (sans unité)

m_{EG,hi} : masse d'éléments grossiers (compris entre 2 et 4 mm) dans l'horizon i (en kg)

C_{C,EG,hi} : teneur en C dans les éléments grossiers compris entre 2 et 4 mm dans l'horizon i (sans unité).

2.3.2.2 Constitution des stocks de C et N corrigés par horizon

Les différences sur la quantité d'éléments grossiers présents dans les sols des parcelles étudiées (témoin 8,5 ± 0,94 %, plantée 39 ± 2,8 % et forêt 15 ± 2,1 %, moyenne ± erreur standard) ne permettent pas de travailler à volume constant.

Une correction massique (Ellert *et al.*, 2002), qui consiste à raisonner à masse de terre fine constante, est nécessaire. Une situation de référence doit être fixée. La parcelle F (appartenant aux parcelles du type plantée) sera la référence car c'est la parcelle ayant le moins de terre fine. Cela permet de ne pas faire de supposition sur la composition du sol au-delà d'un mètre.

La Figure 8 résume visuellement la correction massique.

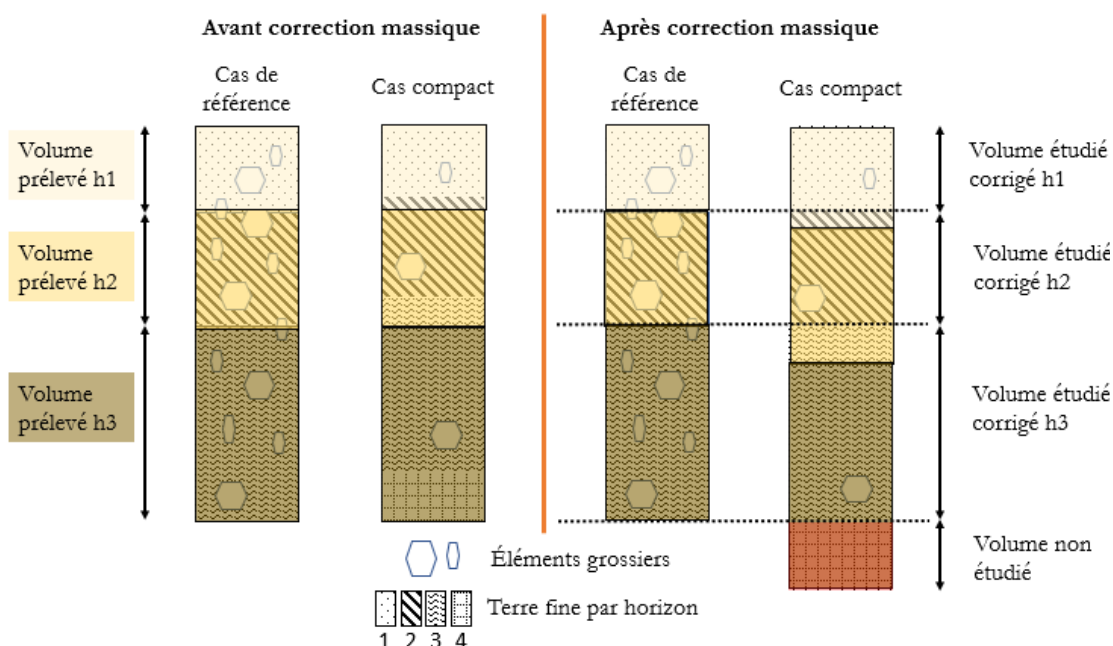


Figure 8 : Schéma explicatif de la correction massique

La méthodologie appliquée est expliquée en détail dans l'Annexe 9, page 55.

Puisque la correction massique revient à « déplacer » des quantités de terre fine et à « mélanger » les horizons cela revient également à modifier la texture du sol. La texture des prélèvements a été corrigée suivant le même principe que pour les stocks de C.

Le script utilisé pour la correction massique des stocks de C est donné en Annexe 10, page 60.

2.3.3. CONSTRUCTION DU MODÈLE ROTH C

Le modèle RothC (Coleman et Jenkinson, 1996) a été choisi pour étudier les dynamiques dans le temps des stocks de C du sol, pour les parcelles plantées. Ce modèle, comportant cinq réservoirs théoriques de C, permet d'étudier l'évolution du C du sol en fonction des apports en MO, la nature de ces apports, la température, l'évapotranspiration, la pluviométrie et le taux d'argile du sol. Ce modèle a l'avantage d'exiger peu de paramètres en entrées et peut être utilisé pour les sols tropicaux (Fujisaki, 2014). Ce modèle est présenté plus en détail en Annexe 11, page 61.

Les données de météo utilisées sont celles de la station météo de Paracou (80 km de Saint-Élie, données mensuelles de 2012 à 2020). La station est éloignée du site d'étude mais il n'y a pas de station météo plus proche.

2.3.3.1 Initialisation du modèle

En l'absence de données juste avant la plantation, ni le stock de C présent dans le sol avant plantation ni sa répartition entre les réservoirs théoriques ne sont connus.

Les hypothèses suivantes ont donc été émises :

- Le stock de C et sa répartition entre les différents réservoirs avant activité étaient les mêmes sur les trois types de parcelle.
- La parcelle plantée a eu, entre la perturbation et la plantation, la même trajectoire de perte de C que la parcelle non plantée.
- Depuis la plantation (huit ans en arrière) la trajectoire du stock de C sur la parcelle plantée suit le modèle RothC

Pour cela, les apports de C qui permettent au stock sous la forêt de se maintenir dans le temps ont été étudiés. Cela suppose que le stock de C sous la forêt est à l'équilibre, ce qui paraît être une hypothèse acceptable dans la mesure où la forêt n'est pas perturbée. Une fois le stock stabilisé, la répartition du C dans les réservoirs théoriques pour la forêt est obtenue. Faire fonctionner RothC sans apport de C a ensuite permis de simuler la perte du couvert forestier lié à l'activité minière, pour arriver au stock mesuré dans la parcelle témoin. En remontant huit ans avant ce stock, toujours avec RothC, le stock de C qu'il y avait juste avant la plantation et sa répartition entre les différents réservoirs sont obtenus.

2.3.3.2 Estimation des apports de carbone sur la parcelle plantée

Pour estimer les apports de C sur la plantation, des *litter traps* (époussettes à feuilles, Annexe 12, p. 64) ont été posés dans la parcelle plantée pour estimer le flux de biomasse aérienne. Cependant, étant donné que ce stage s'inscrit dans la première partie du projet, ces données ne sont pas complètes et donc pas exploitables.

En faisant l'hypothèse qu'à long terme ces apports de C seront égaux à ceux de la forêt, et, connaissant la valeur initiale des apports (zéro au moment de la plantation) et la valeur du stock à huit ans, il est possible de modéliser l'apport de C avec un modèle simple ayant une asymptote, comme le modèle de Michaelis-Menten (Équation 7).

Équation 7 : Évolution théorique des apports de carbone en fonction du temps pour la parcelle plantée : fonction de Michaelis-Menten

$$\text{Apports de C} = \frac{a \times t}{b + t}$$

Apports de C : apports de C mensuel (en t.ha⁻¹.mois⁻¹)

a : apports de C asymptotiques en t.ha⁻¹.mois⁻¹)

b : temps nécessaire pour que les apports atteignent la moitié des apports asymptotiques

t : temps (en années).

Le choix s'est porté sur cette fonction car c'est une fonction à asymptote dont les paramètres sont simples à interpréter, *a* étant la valeur vers laquelle les apports vont tendre dans un temps long et *b* le temps nécessaire pour que les apports de C sur la parcelle plantée atteignent la moitié des apports de C de la forêt.

Faire fonctionner RothC en faisant varier la valeur de b a permis d'estimer ce paramètre, la valeur retenue étant celle qui permet d'obtenir les apports de C qui font passer le stock de C avant plantation au stock de C actuel en huit ans.

2.4. ANALYSE DES DONNÉES

Le traitement des données et leur analyse statistique ont été réalisés sous R – 4.0.3 (R Core Team, 2020).

Les données brutes utilisées sont résumées en Annexe 13, page 66.

2.4.1. ANALYSE DES DONNÉES D'ACTIVITÉ

Malgré le fait que l'hypothèse de normalité ne soit pas respectée, la structure des valeurs est plutôt en forme de « cloche ». Cette non normalité est attribuée au faible nombre de mesures. Par conséquent, les analyses ont tout de même été faites par modèle linéaire mixte pour étudier les différences entre les moyennes par groupe pour chaque indicateur (lmer sur R, package lme4 (Bates *et al.*, 2015)). Ce modèle a l'avantage de permettre de prendre en compte les doubles mesures d'activité réalisées par échantillon, en introduisant un aspect aléatoire sur celui-ci (pseudo-répliques), chose qui paraissait impossible sur des tests non paramétriques. Les différences de moyennes par type de parcelle ont été étudiées à l'aide d'un test post-hoc de Tuckey (lsmeans sur R, package lsmeans (Lenth, 2016)). Le script de la fonction utilisée pour ces tests est donné en Annexe 14, page 70.

2.4.2. ANALYSE DES DONNÉES DES STOCKS DE CARBONE ET D'AZOTE

Tout d'abord, les stocks à un mètre ont été comparés à l'aide d'un modèle linéaire à un facteur suivi d'une Anova et d'un test post-hoc de Tuckey.

Les interactions entre la MO et les argiles, exposées dans l'introduction, font que pour certains auteurs, la teneur en C du sol est corrélée à la teneur en argile (Fujisaki, 2014 ; J. Six *et al.*, 2002). Pour d'autres, la teneur en C est plus corrélée à la teneur en argiles plus limons qu'aux argiles seules (Powers et Schlesinger, 2002 ; de Koning *et al.*, 2003 ; Zinn *et al.*, 2005). Les deux possibilités ont été étudiées en regardant le coefficient de détermination de la relation linéaire entre les stocks de C corrigés par correction massique et, la teneur en argile ou la teneur en argile plus limon. Le modèle ayant le meilleur coefficient de détermination a été conservé. Ensuite, les moyennes des stocks de C, ajustés par la teneur utilisée, des trois types de parcelles ont été comparées. Pour cela une analyse de la covariance puis une analyse post-hoc pour comparer les moyennes ont été réalisées (emmeans dans R, package emmeans (Russell V. Lenth, 2021)). Le script de la fonction utilisée pour ces tests est donné en Annexe 15, page 71.

2.4.3. EXÉCUTION DU MODÈLE ROTH C

Le package « SoilR » (Sierra *et al.*, 2012) contient les fonctions nécessaires au fonctionnement de RothC et un code R est proposé par Sierra (2015). Les moyennes des stocks de C (à masse équivalente de terre fine et ajustées par le taux d'argiles) et le taux d'argiles associé ont été utilisés pour la simulation, dans le but de pouvoir comparer des stocks de C comparables entre les parcelles. Le script utilisé pour la modélisation est donné en Annexe 16, page 72.

3. RÉSULTATS

Dans cette section la convention suivante pour présenter les p-valeurs a été suivie : * $p(H_0) < 0,05$; ** $p(H_0) < 0,01$; *** $p(H_0) < 0,001$. Les données utilisées ainsi que le résumé des tests statistiques utilisés dans cette partie sont données en Annexe 17, page 73, sauf exceptions qui seront alors précisées.

3.1. INDICATEURS D'ACTIVITÉS MICROBIENNES

Dans cette partie, l'étude s'est concentrée sur l'horizon 1 (0-20 centimètres) car les mesures d'activités sont très faibles dans les autres horizons et les différences entre les types de parcelle ne sont pas significatives (Annexe 13, p. 66).

Les valeurs prises par les indicateurs sont représentées par boxplot suivant le type de parcelle. Les croix rouges indiquent les moyennes par type. Les rectangles représentent le premier quartile, la médiane et le troisième quartile.

Les accolades présentent des différences significatives entre les moyennes (H_0 du test associé : « les moyennes des deux types comparés sont égales »). La p-valeur associée est présentée selon la norme définie au début de la section Résultats.

3.1.1. LA BIOMASSE MICROBIENNE ACTIVE DU SOL

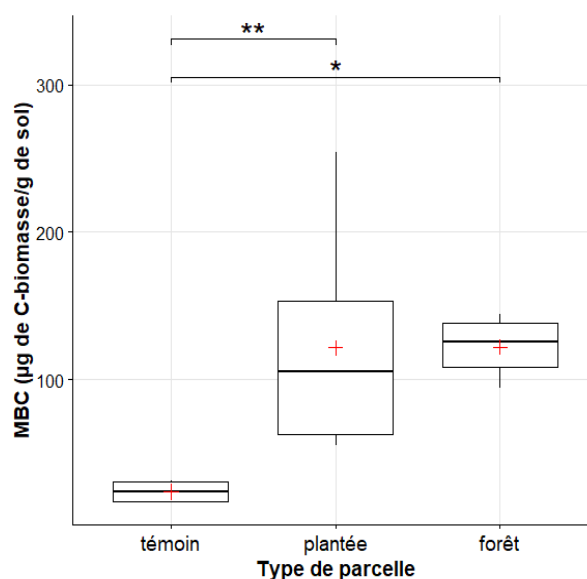


Figure 9 : Biomasse microbienne vivante par type de parcelle (données Tableau 7)

D'après la Figure 9 il y a :

- Une baisse significative de la biomasse microbienne vivante dans le sol entre la forêt et le témoin ce qui confirme l'hypothèse que le sol est bien moins propice au développement des MiOS après activité minière.
- Pas de différence significative entre la forêt et les parcelles plantées.

3.1.2. LE RATIO DEA/SIR

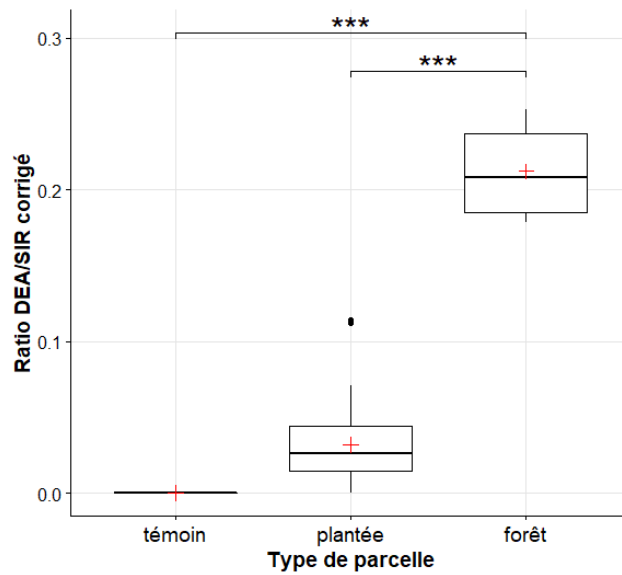


Figure 10 : Ratio DEA/SIR corrigé par type de parcelle (données Tableau 8)

D'après la Figure 10 :

- Le ratio est environ 1000 fois plus fort pour la forêt que pour le témoin, ce qui confirme que la diversité des MiOS est fortement diminuée après l'activité minière.
- La parcelle plantée semble être intermédiaire entre le témoin et la forêt. Bien que le sol sous la plantation ait une diversité microbienne plus importante que la parcelle témoin, elle n'est pas significativement différente de la parcelle témoin (p-value de 0,55).

3.1.3. LE QUOTIENT RESPIRATOIRE JOURNALIER

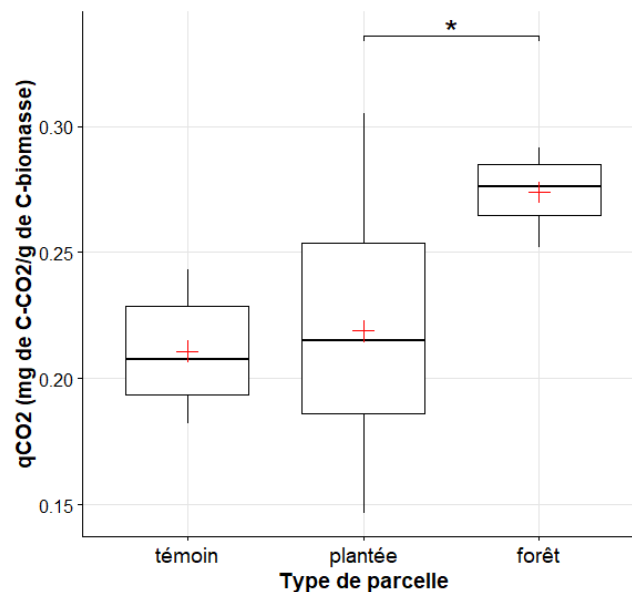


Figure 11 : Quotient respiratoire journalier par type de parcelle (données Tableau 9)

D'après la Figure 11 :

- Le quotient respiratoire journalier est plus fort pour la forêt que pour la plantation.
- Le quotient respiratoire entre la parcelle témoin et la parcelle forêt ne sont pas différents.

3.1.4. LE QUOTIENT MICROBIEN

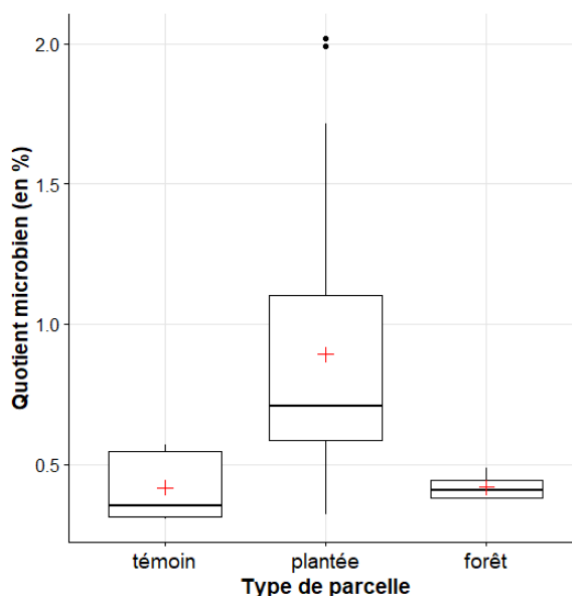


Figure 12 : Quotient microbien par type de parcelle (données Tableau 10)

D'après la Figure 12 :

- Les moyennes des quotients microbiens ne sont pas significativement différentes entre les types de parcelle bien que la tendance de celui-ci semble être que celui-ci soit plus important pour la parcelle plantée.

3.1.5. LE TAUX DE MINÉRALISATION GLOBAL

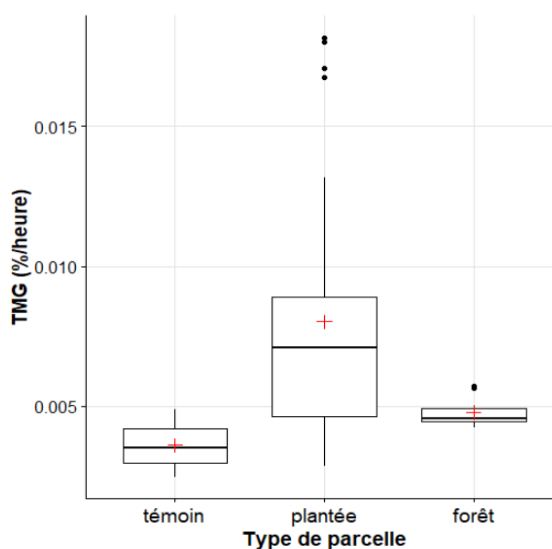


Figure 13 : Taux de minéralisation global par type de parcelle (données Tableau 11)

D'après la Figure 13 :

- Il n'y a pas de différence significative entre les types de parcelle.
- Cependant le taux de minéralisation global tend à être important pour la parcelle plantée.

3.2. STOCKS DE CARBONE ET D'AZOTE

3.2.1. STOCKS DE CARBONE ET D'AZOTE BRUTS SUR UN MÈTRE

Les teneurs en C et azote dans les éléments grossiers (entre 2 et 4 mm) sont élevées (Annexe 13), proches de celles de la terre fine. Cela pourrait s'expliquer par le fait que le tamisage ait été fait avec un maillet sur un tamis : les macroagrégats qui une fois secs sont très durs, n'ont pas tous été cassés. Les éléments considérés comme grossiers étaient en partie de la terre fine agglomérée. Cela n'influe pas sur le calcul des stocks sur un mètre.

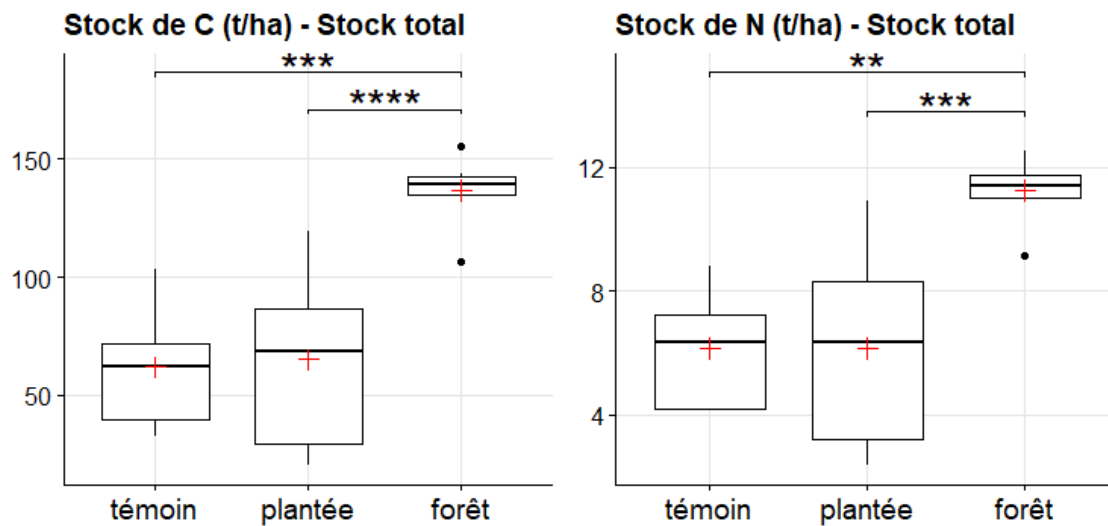


Figure 14 : Répartition des stocks bruts de carbone et d'azote sur un mètre (données Tableau 12)

D'après la Figure 14, pour les deux stocks il y a une différence significative entre la forêt et les parcelles plantées ou témoin. Le premier mètre de sol sous la forêt contient plus de C et d'azote, comme nous l'attendions. En revanche il n'y a pas de différence significative entre les parcelles plantées et la parcelle témoin. Ces rapports entre les stocks des différents types de parcelles sont les mêmes pour les trois horizons.

3.2.2. STOCKS DE CARBONE ET D'AZOTE CORRIGÉS PAR HORIZON

Cette partie de l'étude est menée dans un référentiel massique.

3.2.2.1 Évolution de la masse de terre fine de référence

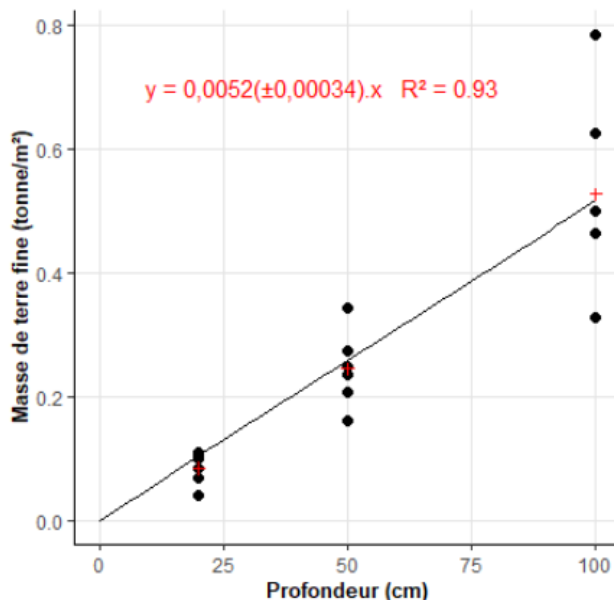
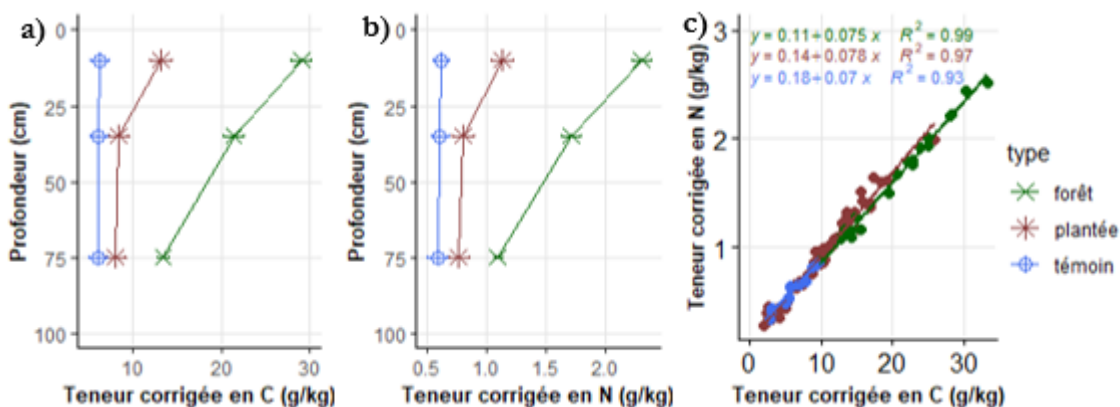


Figure 15 : Évolution de la masse de terre fine de référence avec la profondeur (données Tableau 13)

La masse de terre fine évolue de manière linéaire avec la profondeur.

3.2.2.2 Évolution des teneurs en carbone et en azote



Figures 16 : Évolution des teneurs corrigées en carbone et en azote de la terre fine avec la profondeur (données Tableau 14)

Les évolutions des teneurs en C et en azote suivent les mêmes courbes. Ceci s'explique par la forte corrélation entre l'azote et le C organique. D'après les Figures 16 a et b, les teneurs en C et en azote ne décroissent plus avec la profondeur à partir de l'horizon 2.

3.2.2.3 Stocks de carbone corrigés et ajustés

La correction massique n'a eu qu'un très faible impact sur les textures (Annexe 19, p. 76). L'effet de la variation du taux d'argiles ou du taux d'argiles plus limons sur les stocks de C entre les parcelles doit alors être limité. Les deux possibilités d'ajustement (p.20) ont été étudiées (Annexe 20).

Il s'avère que sur l'ensemble des possibilités d'études (par parcelle, par horizon ou globale), les stocks de C sont mieux expliqués par les taux d'argiles que les taux d'argiles plus limons. L'ajustement des moyennes des stocks de C et d'azote a donc été fait avec la teneur en argiles.

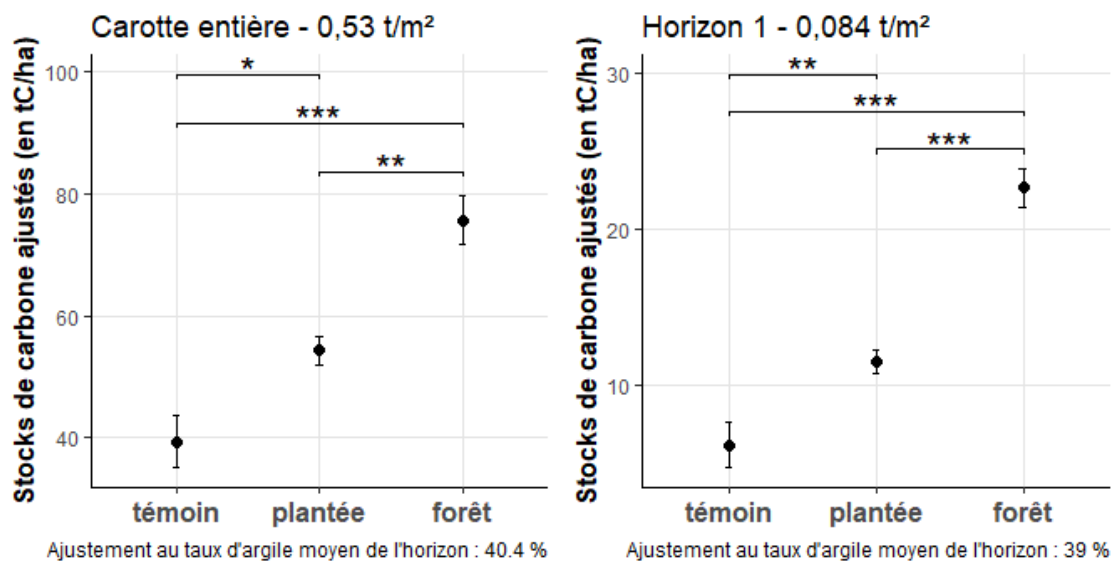


Figure 17 : Moyennes ajustées des stocks de carbone pour l'ensemble de la carotte (gauche) et pour l'horizon 1 (droite). Les barres d'erreurs correspondent à plus ou moins l'erreur standard (données Annexe 21).

Le stock de la parcelle témoin semble relativement important pour une parcelle sans végétation (Figure 17). La parcelle plantée contient un stock intermédiaire entre la parcelle témoin et la forêt. Cet écart significatif entre les parcelles plantées et la parcelle témoin ne se retrouve que dans l'horizon 1 (Annexe 21, p. 79).

Il est important de noter que la différence entre le stock sous la plantation et le stock sous la parcelle témoin ne correspond pas au stock accumulé depuis la plantation. En effet, des MiOS sont présents dans la parcelle témoin et donc minéralisent le C présent. Le stock initial sous la parcelle plantée devait être supérieur à celui mesuré aujourd'hui sur la parcelle témoin.

Un résumé de l'évolution du stock de C avec les différentes corrections effectuées est présenté Annexe 22, page 80.

Au final, dans notre étude, un modèle linéaire simple permet de prédire des stocks de C en fonction de la masse d'argile. Ce modèle est décrit dans les Équations 8.

Équations 8 : Stock de carbone en fonction de la masse d'argiles	
<i>Témoin</i> : Stock de C = 0,018 (±0,001) * $m_{argiles}$	$R^2 = 0,95$; $p = 1,004. 10^{-10}$
<i>Plantée</i> : Stock de C = 0,025 (±0,001) * $m_{argiles}$	$R^2 = 0,94$; $p < 2,2. 10^{-16}$
<i>Forêt</i> : Stock de C = 0,032 (±0,001) * $m_{argiles}$	$R^2 = 0,96$; $p < 2,2. 10^{-16}$
<i>Stock de C</i> : stock de C dans le sol (en t.ha ⁻¹)	
<i>m_{argiles}</i> : la masse d'argiles dans le sol étudié (en tonne.ha ⁻¹)	

Pour cette étude il existe un lien très significatif entre le stock de C et la masse d'argile.

3.2.2.4 Stocks d'azote corrigés et ajustés

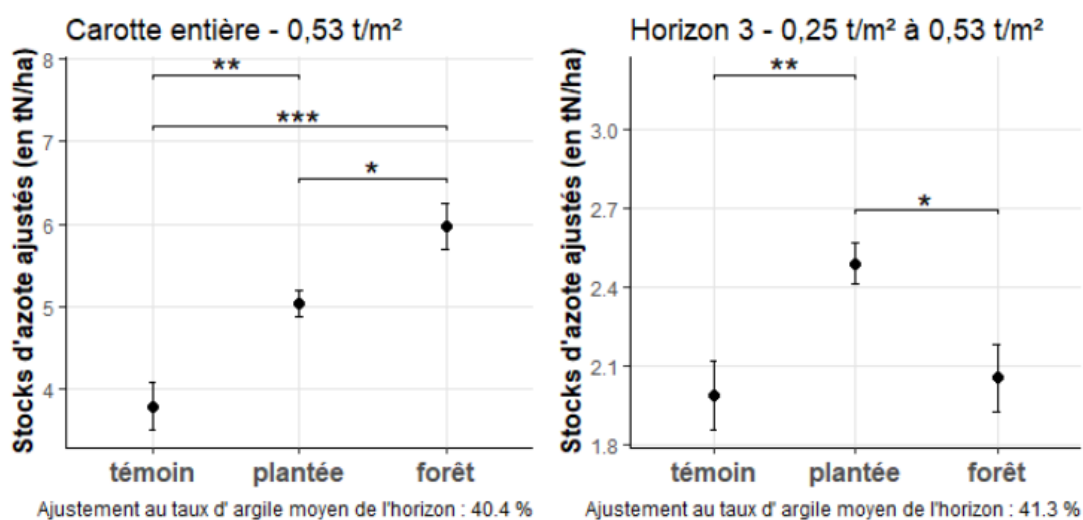


Figure 18 : Moyennes ajustées des stocks d'azote pour l'ensemble de la carotte (gauche) et pour l'horizon 3 (droite). Les barres d'erreurs correspondent à plus ou moins l'erreur standard (données Annexe 21).

Comme l'azote et le C sont fortement corrélés, les rapports entre les stocks d'azote et les stocks de C sont les mêmes (Figure 18), avec une position intermédiaire pour la parcelle plantée sur la carotte entière et sur l'horizon 1 (Annexe 23, p. 82). Cependant, pour le troisième horizon de référence, le stock d'azote est supérieur pour la parcelle plantée.

3.3. ÉVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE AVEC ROTHC

Seuls les deux premiers horizons ont été étudiés pour ne pas être parasité par les stocks de C résiduels en profondeur, d'autant plus qu'il n'y a pas de différence significative entre les stocks de C de la parcelle plantée et de la parcelle forêt pour l'horizon 3 (Annexe 21, p. 79).

Le Tableau 3 résume les données de stocks utilisées dans cette partie.

Tableau 3 : Moyennes ajustées par la teneur en argile des stocks de C pour nos deux premiers horizons de référence réunis (teneur en argile de 39,4%)

Type	Moyennes ajustées des stocks de carbone pour les premiers 0,25 t.ha ⁻¹ (tC.ha ⁻¹)	Erreur standard
Témoin	18,3	2,55
Plantée	27,2	1,37
Forêt	50,9	2,28

3.3.1. INITIALISATION DU MODÈLE

Le stock initial avant plantation obtenu est de 22,6 tC.ha⁻¹. D’après le modèle, la terre utilisée pour réhabiliter est restée à nu 17 ans avant la plantation. Il est intéressant de regarder l’évolution de la modélisation si le stock initial avait été supérieur de 25% ou de 50% à celui obtenu, pour simuler l’effet du lessivage potentiellement supérieur lors du stockage de la terre avant la réhabilitation.

3.3.2. ESTIMATION DES APPORTS DE CARBONE SUR LA PARCELLE PLANTÉE

La courbe suivante décrit l’évolution des apports de C sur la parcelle plantée obtenue.

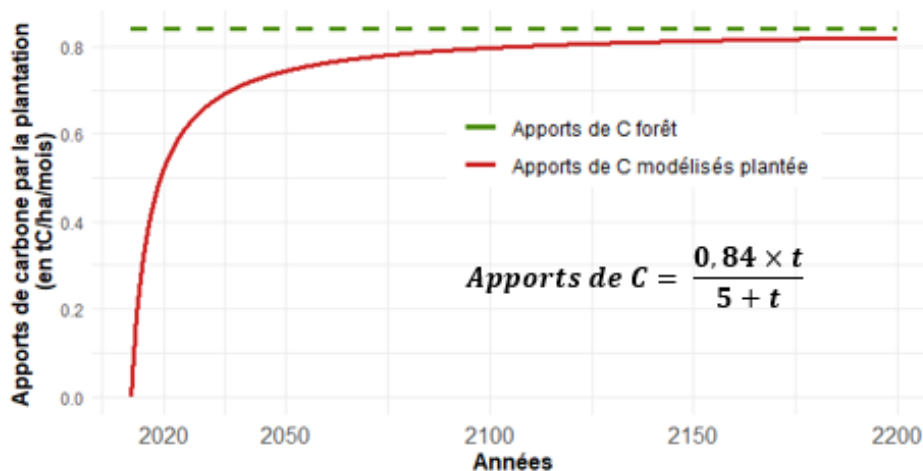


Figure 19 : Évolution des apports mensuels de carbone prédits pour la parcelle plantée

Dans cette modélisation les apports de C de la parcelle plantée seront égaux à 95 pourcents de ceux de la forêt d’ici une soixantaine d’années. De plus, dans ce modèle, les apports de C de la plantation atteignent la moitié de ceux de la forêt en 5 ans.

Cependant, le temps nécessaire pour atteindre la moitié des apports de C en forêt est fortement influencé par le stock initial de C (Figure 20).

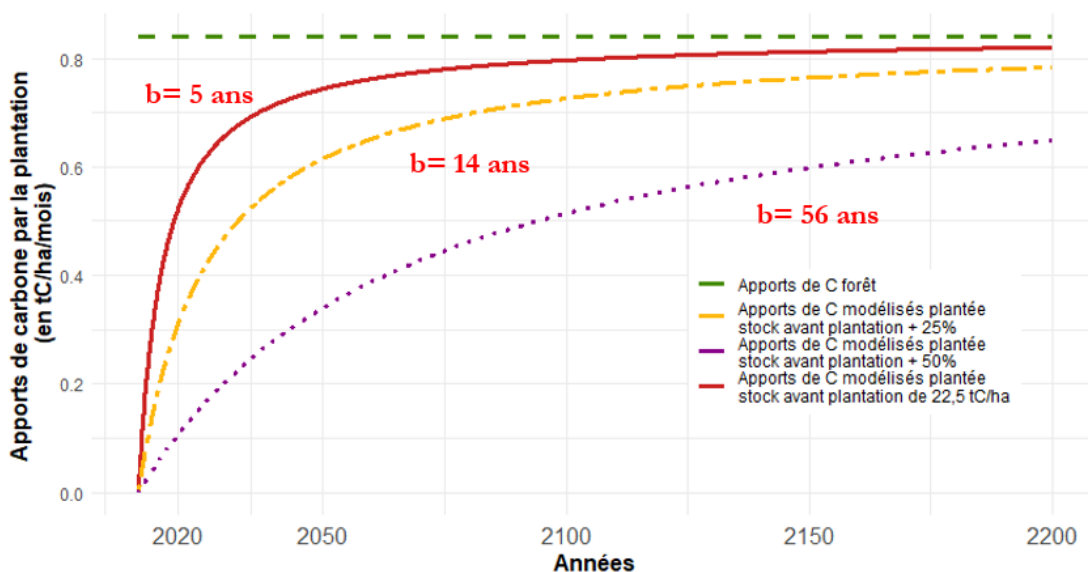


Figure 20 : Évolution des apports de carbone simulés en fonction du stock avant plantation

3.3.3. ÉVOLUTION DU STOCK DE CARBONE SUR LA PARCELLE PLANTÉE

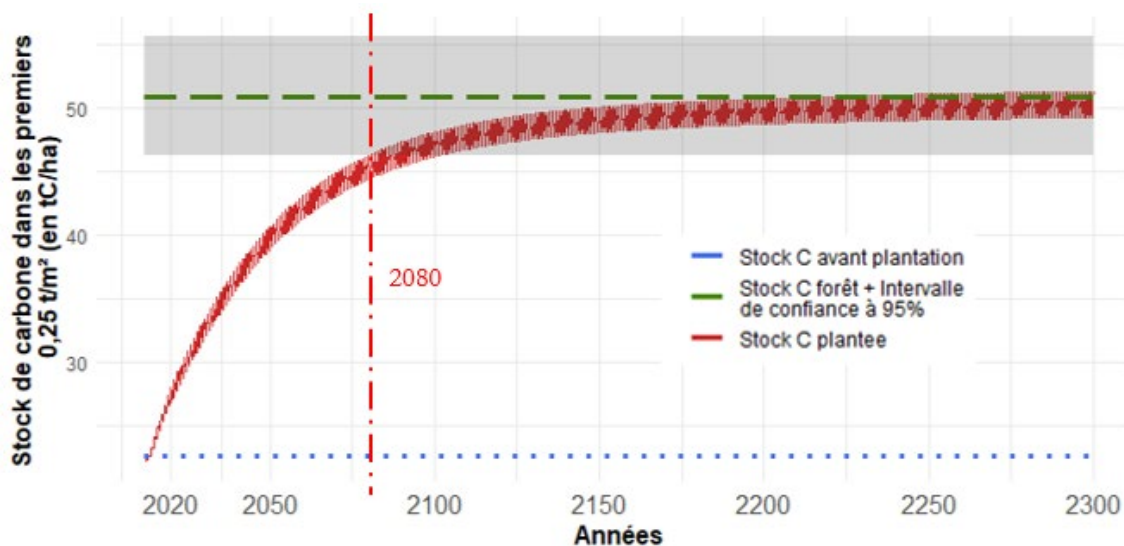


Figure 21 : Évolution du stock de carbone dans les premiers 0,25 t/m² en fonction du temps

Suivant les hypothèses de modélisation faites, d'ici 2080, les stocks de C sous la plantation ne seront plus significativement différents de ceux mesurés sous la forêt avec ce dispositif (Figure 21) . Ainsi il suffira de soixante-dix ans de plantation pour retrouver les stocks de C présents à l'origine.

Cependant, le temps nécessaire pour atteindre les stocks de C sous la forêt varie fortement avec la valeur du stock initial avant plantation (Figure 22).

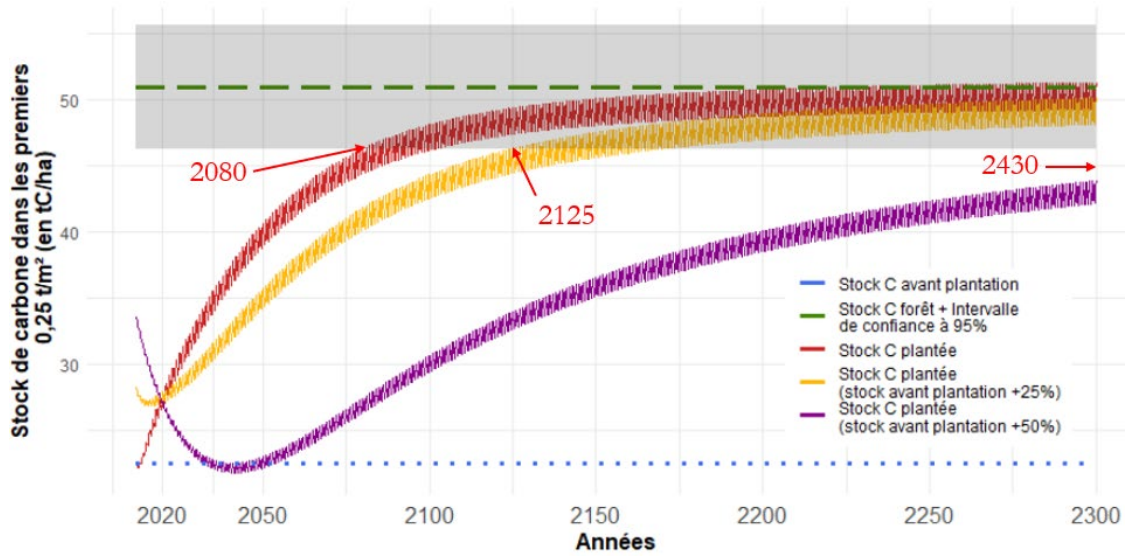


Figure 22 : Évolution des stocks de carbone simulés en fonction du stock de carbone avant plantation

Ce temps nécessaire pour atteindre les stocks sous forêt dépend aussi fortement des apports asymptotiques de C (Figure 23). Ceux-ci déterminent aussi le stock de C vers lequel tendra la plantation à l'équilibre.

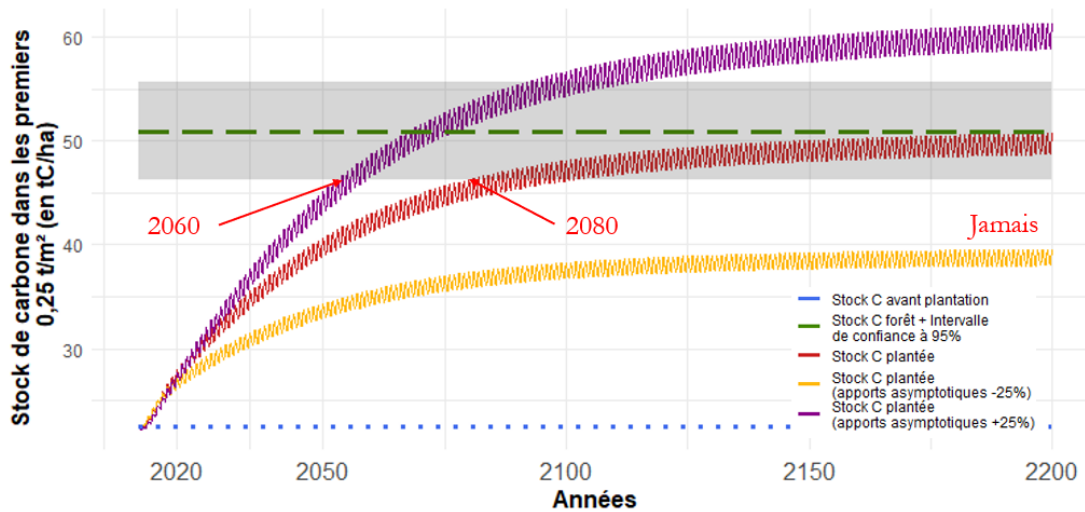


Figure 23 : Évolution des stocks de carbone simulés en fonction des apports asymptotiques de carbone

4. DISCUSSION

4.1. INDICATEURS D'ACTIVITÉS MICROBIENNES

4.1.1. L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE A PERMIS DE RÉCUPÉRER UNE PARTIE DES FONCTIONS DU SOL

Les activités microbiennes montrent que la plantation d'arbres fixateurs d'azote permet de restaurer la biomasse microbienne (p. 21) et une partie de sa diversité (p. 22), huit ans après la revégétalisation. Ces résultats rejoignent ceux de Schimann *et al.* (2012). La plus faible quantité de dénitrifiants dans le sol de la plantation limite les pertes potentielles d'azote comparativement à la forêt. La communauté de MiOS de la plantation est donc potentiellement plus conservatrice en azote que celle de la forêt. Ainsi, malgré la forte perturbation induite par l'activité minière et grâce à l'ingénierie écologique, le sol récupère peu à peu ses fonctions, avec une optimisation des flux d'azote. Il serait intéressant de renouveler cette étude pour voir si la diversité microbienne est entièrement retrouvée à terme et si l'optimisation vis-à-vis de l'azote est conservée.

4.1.2. LES MICRO-ORGANISMES DU SOL DE LA PLANTATION SEMBLENT AVOIR UNE MEILLEURE EFFICIENCE D'UTILISATION DU CARBONE

D'après l'étude du quotient respiratoire journalier (p.22), les MiOS sous la plantation ont une meilleure efficacité énergétique car les pertes lors de la respiration sont moins importantes que sous la forêt.

D'après l'étude du quotient microbien (p.23), cette meilleure efficacité énergétique de la MO semble être couplée à une meilleure disponibilité du C organique pour les MiOS sous la plantation.

La CUE des MiOS de la plantation semble donc être meilleure que celle de la forêt (p.23), le potentiel de stockage de C devrait donc être supérieur pour la plantation. De plus, les résidus issus du métabolisme des MiOS étant des composés persistants dans le temps (Martins et Angers, 2015), nous pouvons faire l'hypothèse que le stock de C sous la plantation sera plus stable dans la durée.

Il serait intéressant de renouveler les mesures d'activités pour voir si cette différence de CUE se maintient avec la croissance de la plantation.

4.1.3. CETTE MEILLEURE EFFICIENCE DE LA COMMUNAUTÉ MICROBIENNE SEMBLE ÊTRE DÛE À LA MEILLEURE QUALITÉ DES LITIÈRES DE LA PLANTATION

L'étude du taux de minéralisation global permet de conclure, avec précautions, que les MiOS sous la parcelle plantée consomment plus de MO que sous les parcelles témoin et forestière (p. 23). La qualité de la MO apportée par les fixateurs d'azote serait donc meilleure pour les MiOS que celle apportée par la forêt. Ceci explique que malgré la moins

grande quantité de litière apportée sur la parcelle plantée, les MiOS sont capables de se maintenir au niveau de ceux sous la forêt.

4.2. STOCKS DE CARBONE ET D'AZOTE

A posteriori, les stocks de C et d'azote étant fortement corrélés (p. 25), il n'était pas nécessaire de les traiter tous les deux. L'étude des stocks de C seulement aurait suffi.

4.2.1. LES STOCKS BRUTS MESURÉS SONT DANS LA MOYENNE ET NE PERMETTENT PAS DE CONCLURE SUR L'EFFET DE LA PLANTATION

Les stocks de C bruts mesurés sous forêt à Saint-Élie sont supérieurs à ceux mesurés dans Stahl *et al.* (2016), 100 tC.ha⁻¹, mais en dessous de la moyenne obtenue pour les ferralsols de Guyane dans Brossard *et al.* (2018), 162 tC.ha⁻¹. Le stock de C brut sous notre forêt est donc dans la moyenne basse des ferralsols Guyanais.

4.2.2. LES STOCKS CORRIGÉS AJUSTÉS MONTRENT QUE LES STOCKS SOUS LA PLANTATION SONT INTERMÉDIAIRES

La référence choisie a une faible quantité de terre fine (Figure 15, p.25). En effet, Gifford et Roderick (2003) conseillent de considérer les 1,2 premières tonnes par mètre carré pour étudier les stocks de C à un mètre. Les stocks étudiés dans cette étude sont plus faibles que si la référence des 1,2 tonnes avait été choisie.

Les teneurs en C et en azote devraient décroître avec la profondeur (Ellert *et al.*, 2002)(Annexe 18, p. 75) or, elles ne le font pas pour la parcelle témoin. Il semblerait qu'il reste de la MO en profondeur liée à la modification du profil de sol lors de la réhabilitation après l'activité minière et le mélange des horizons. Celle-ci serait sous forme stable et donc difficilement métabolisée.

Les stocks de C et d'azote de la plantation, corrigés et ajustés par la teneur d'argiles, sont intermédiaires, entre témoin et forêt (Figure 17, p. 26 et Figure 18, p. 27). Cette différence n'étant visible que sur l'horizon supérieur, cela met en évidence que le stock de C se refait par le haut, notamment par l'apport de la litière à la surface du sol. Cela montre que, par rapport à une situation sans revégétalisation, la plantation a permis d'augmenter les stocks de C. Avec ces données, il est impossible de savoir si ce stock de C est supérieur à celui présent au moment de la plantation, et dans ce cas que les fixateurs d'azote ont permis d'augmenter le stock de C depuis le début de la plantation, ou si la plantation a juste permis de moins perdre de C que dans la situation témoin. Pour creuser ces hypothèses une approche par modélisation des stocks de C a été choisie.

Il y a une accumulation d'azote sous la parcelle plantée (Figure 18, p. 27), cela pourrait être dû à la MO racinaire riche en azote. Cet azote organique n'est alors pas entièrement mobilisé en profondeur à cause des conditions d'anaérobiose.

Il est important de souligner que la référence pour les stocks de carbone n'est pas parfaite car, avec les contraintes imposées par l'étude des activités microbiennes, la parcelle forestière de référence n'est pas exactement dans le même contexte topographique que les parcelles plantées. Il serait envisageable que les parcelles plantées reçoivent un peu de matière organique par ruissellement, par leur position en bas de vallon, apports qui pourraient être synonymes de pertes pour la forêt située plus en hauteur.

4.2.3. LES CORRECTIONS APPLIQUÉES RENDENT DIFFICILE LA COMPARAISON AVEC LA LITTÉRATURE, LA PRISE EN COMPTE DE LA MASSE D'ARGILE POURRAIT RÉSOUDRE CE PROBLÈME

Travailler sur des stocks corrigés ajustés induit une grosse difficulté à comparer ces stocks avec la littérature. En effet, la correction massive impose de travailler à masse de terre fine constante (p. 17). La comparaison avec d'autres travaux nécessite les masses de terre fine de référence utilisées (donnée dans Stahl *et al.* (2016) notamment). L'ajustement des stocks par la teneur en argile nécessite, de la même manière, la teneur en argile de référence à laquelle les stocks ont été ajustés (non donnée dans Stahl *et al.* (2016)).

Le modèle reliant le stock de C et la masse d'argile (p.27) serait un bon moyen d'étudier l'impact de différentes pratiques en comparant les pentes obtenues. Cette comparaison n'est possible que pour des argiles du même type. Dans cette étude le type d'argile est supposé être le même sur les trois parcelles, hypothèse acceptable avec la proximité spatiale des sites. Cependant, Six *et al.* (2002) soulignent que les argiles de type 2:1 (deux feuillets de silice pour un d'aluminium) sont plus aptes à fixer la MO du sol que les argiles de type 1:1.

4.3. ÉVOLUTION DU STOCK DE CARBONE AVEC LE MODÈLE ROTHC

4.3.1. L'INITIALISATION DE STOCKS DE CARBONE CONDITIONNE LA DURÉE NÉCESSAIRE À LA RECONSTITUTION DE CES STOCKS

Suivant les hypothèses faites (p.19) le modèle indique que la terre utilisée pour réhabiliter est restée 17 ans sans végétation avant la plantation (p.28). Ce résultat n'a pas pu être confirmé. Cet âge conditionne le paramétrage du modèle des apports du C. Si la terre est restée moins longtemps sans végétation alors la perte de C par an est supérieure, donc le stock avant plantation aussi. Cela induit un plus faible regain de C sur les huit ans dans la plantation et donc des apports de C moins importants. Au final cela induit une durée plus longue pour la reconstitution des stocks de C.

Avec le stock de départ estimé, les apports de la plantation atteignent la moitié de ceux de la forêt en cinq ans (p.28) ce qui semble optimiste. Cependant, il est important de constater que la plantation pousse très vite (15 mètres en huit ans) et que les apports de C de celle-ci pourraient vite rejoindre ceux de la forêt. Dans ce scénario, le stock avant plantation étant inférieur à celui mesuré à huit ans, le stock de carbone sous la plantation a donc déjà commencé à augmenter.

En faisant varier ce stock de départ de 50% (p.29) le résultat semble, à contrario, pessimiste car ce stock est atteint au bout de six ans après le retrait de la forêt sans apport de C avec le modèle. En supposant qu'il n'y ait pas de lessivage, cela signifierait que la revégétalisation ait été faite six ans après le début de l'exploitation, ce qui semble court.

Il est alors raisonnable de supposer que l'ordre de grandeur du temps nécessaire à la reconstitution du stock de C sous la plantation soit de l'ordre de la centaine d'année.

4.3.2. SOUS CERTAINES CONDITIONS, LES STOCKS SOUS LA PLANTATION POURRAIENT DÉPASSER CEUX DE LA FORÊT

La valeur obtenue pour les apports asymptotiques de C de la plantation, estimés être ceux de la forêt, est de $10,1 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ (p.27). Cette valeur est supérieure à celle trouvée par Fujisaki (2014) qui est de $8,3 \text{ tC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. Dans son travail, seuls les 30 premiers centimètres sont étudiés ce qui nécessite des apports de C moins important pour maintenir les stocks.

À la fin du projet, les données de litière et l'estimation des biomasses racinaires devraient permettre d'améliorer la modélisation de l'évolution des apports de C (p. 64), en ajoutant le point des apports de C à huit ans dans notre modèle

En supposant que les apports de C de la plantation soient supérieurs à terme ou mieux intégrés au C du sol, les stocks de C sous la plantation pourraient dépasser ceux de la forêt (p. 30).

Il est important de souligner que le retour du C dans les sols après activité minière est important mais que, même si celui-ci dépasse le stock initialement présent, il ne permettra jamais de compenser celui généré au cours de l'activité, notamment celui issu de la consommation de carburant pendant la production d'or (une grosse pelle mécanique consomme plusieurs centaines de litres de gasoil par jour de production).

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette étude a montré que l'ingénierie écologique avec la plantation d'arbres fixateurs d'azote, lors d'une revégétalisation sur site minier en Guyane française, permet à la communauté microbienne du sol de se redévelopper et d'atteindre le niveau qu'il y avait avant l'activité minière. La diversité de cette communauté est fortement impactée lors de l'activité minière et la revégétalisation effectuée a permis de la restaurer en partie. La litière générée par ces arbres fixateurs d'azote semble permettre aux MiOS de se développer de manière plus efficace qu'avec la litière forestière. Les stocks de C et d'azote ont aussi commencés à être régénérés et le stock initial pourrait être récupéré d'ici une centaine d'années.

Une étude sur du plus long terme des activités microbiennes permettra de constater si la récupération de la diversité des MiOS sera totale ou non et si le meilleur CUE se maintient pour la plantation.

Il serait intéressant de comparer les stocks de carbone obtenus dans ce travail à des stocks mesurés sur des parcelles forestière dans la zone d'étude mais en fond de vallon cette fois. Cela permettrait d'avoir une deuxième forêt de référence et ainsi de voir si la différence de contexte topographique entre les parcelles revégétalisées et la parcelle de référence choisie n'a pas joué en faveur des parcelles revégétalisées.

L'utilisation du modèle RothC a permis de se projeter à moyen et long terme mais les résultats sont très perfectibles. Il serait intéressant de poursuivre cette étude en se concentrant sur les stocks des parcelles plantée et témoin. Cela permettrait d'avoir des mesures supplémentaires pour caler de manière plus précise les modèles d'évolution des stocks de C. Une étude de la production de litière et son évolution dans le temps permettrait d'améliorer le modèle d'évolution des apports de C.

Au-delà de la restauration des terrains miniers, l'étude de la restauration des terres dégradées semble utile et nécessaire en Guyane. En effet les terres agricoles sont actuellement gagnées sur la forêt primaire dans le but d'augmenter l'autonomie alimentaire de la Guyane. Or de nombreux terrains sont abandonnés car dégradés par une activité trop intensive ou par une défriche mal menée (DGT, 2020). Restaurer ces terrains en permettant au sol de retrouver ses fonctions permet de répondre à plusieurs besoins du territoire : produire des denrées agricoles, limiter l'utilisation d'engrais chimiques trop onéreux, restocker du C, produire de la biomasse énergie et préserver la forêt.

6. RÉFÉRENCES

- Anderson J.P.E. et Domsch K.H. 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 10(3). DOI : 10.1016/0038-0717(78)90099-8
- Bates D., Mächler M., Bolker B., et Walker S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), p. 1-48.
- Basile-Doelsch I., Balesdent J., et Pellerin S. 2020. *Reviews and syntheses: The mechanisms underlying carbon storage in soil*. Biogeochemistry: Soils, Disponible sur : <https://bg.copernicus.org/preprints/bg-2020-49/bg-2020-49.pdf> (Consulté le 6 janvier 2021).
- Beare M.H., Neely C.L., Coleman D.C., et Hargrove W.L. 1991. Characterization of a substrate-induced respiration method for measuring fungal, bacterial and total microbial biomass on plant residues. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 34(1-4). DOI : 10.1016/0167-8809(91)90094-E
- Binkley D. et Giardina C. 1998. Why do tree species affect soils ? The Warp and Woof of tree-soil interactions. *Biogeochemistry*, 42, p. 89-1906.
- Blagodatskaya E., Blagodatsky S., Anderson T.-H., et Kuzyakov Y. 2014. Microbial Growth and Carbon Use Efficiency in the Rhizosphere and Root-Free Soil. *PLoS ONE*, 9(4). DOI : 10.1371/journal.pone.0093282
- Brossard M., Barthès B., Perrin A.-S., Courte A., Fujisaki K., Kouakoua E., Cambou A., Moulin P., Beaucher E., et Sarrazin M. 2018. *Stocks de carbone des sols de Guyane : Mesure et distribution*. ADEME, 63 p. Disponible sur : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/carsguy_gestion_stock_carbone_guyane_rapport.pdf (Consulté le 15 décembre 2020).
- Coleman K. et Jenkinson D.S. 1996. RothC-26.3 - A Model for the turnover of carbon in soil. Dans : Powlson D.S., Smith P., Smith J.U. (éd.). *Evaluation of Soil Organic Matter Models*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 237-246. Disponible sur : http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-61094-3_17 (Consulté le 10 novembre 2020).
- Couic E., Grimaldi M., Alphonse V., Balland-Bolou-Bi C., Livet A., Giusti-Miller S., Sarrazin M., et Bousserhine N. 2018. Mercury behaviour and C, N, and P biogeochemical cycles during ecological restoration processes of old mining sites in French Guiana. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 20(4). DOI : 10.1039/C8EM00016F
- Coulin N. 2021a. *Mesure de l'activité dénitrifiante potentielle (Denitrifying Enzyme Activity, DEA)*. [Document interne]
- Coulin N. 2021b. *Mesure de l'activité respiratoire potentielle (Substrate Induce Respiration, SIR)*. [Document interne]

- Derrien D., Dignac M.-F., Basile-Doelsch I., Barot S., Cécillon L., Chenu C., Chevallier T., Freschet G.T., Garnier P., Guenet B., Hedde M., Klumpp K., Lashermes G., Maron P.-A., Nunan N., et Roumet C. 2016. Quels mécanismes, quelles pratiques agricoles, quels indicateurs ? *Etude et Gestion des Sols*, p. 32.
- DGTM. 2020. *Un meilleur encadrement des défrichements : un enjeu pour l'accompagnement des agriculteurs dans la mise en valeur de leur parcelle et pour le développement agricole du territoire.*
- Ellert B.H., Janzen H.H., et Entz T. 2002. Assessment of a Method to Measure Temporal Change in Soil Carbon Storage. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5). DOI : 10.2136/sssaj2002.1687
- Elser J.J., Bracken M.E.S., Cleland E.E., Gruner D.S., Harpole W.S., Hillebrand H., Ngai J.T., Seabloom E.W., Shurin J.B., et Smith J.E. 2007. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 10(12). DOI : 10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x
- Falloon P., Smith P., Coleman K., et Marshall S. 1998. Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(8-9). DOI : 10.1016/S0038-0717(97)00256-3
- FAO. 2021. *Portail d'information sur les sols*. Disponible sur : <http://www.fao.org/soils-portal/about/definitions/fr/> (Consulté le 7 janvier 2021).
- de Forges A.R., Feller C., et Jamagne M. 2008. Perdus dans le triangle des textures. *Etude et Gestion des Sols*, 15, p. 16.
- Fujisaki K. 2014. *Devenir des stocks de carbone organique des sols après déforestation et mise en culture : une analyse diachronique en contexte amazonien.* (Doctorat). Montpellier : Centre International d'études supérieures en Sciences Agronomiques, 237 p. Disponible sur : https://www.supagro.fr/theses/extranet/14-0036_Fujisaki.pdf (Consulté le 15 décembre 2020).
- Gifford R.M. et Roderick M.L. 2003. Soil carbon stocks and bulk density: spatial or cumulative mass coordinates as a basis of expression? *Global Change Biology*, 9(11). DOI : 10.1046/j.1365-2486.2003.00677.x
- Gouvernement Français. 2017. *La COP 21*. Dans : *Gouvernement.fr*. Disponible sur : <https://www.gouvernement.fr/action/la-cop-21> (Consulté le 1 avril 2021).
- Groupe de travail « Biologie du sol - application » (BSA). 2009. *Guide à l'utilisation et à l'interprétation des paramètres biologiques du sol*. Frick : 25 p. Disponible sur : https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/boden/fachinfo-daten/arbeitshilfe_bodenbiologischeparameter.pdf.download.pdf/aide_a_la_mise_oeuvreparametresbiologiquesdusol.pdf (Consulté le 3 mars 2021).
- Initiative « 4 pour 1000 ». 2021. *4 pour 1000*. Disponible sur : <https://www.4p1000.org/fr> (Consulté le 1 avril 2021).

- de Koning G.H.J., Veldkamp E., et López-Ulloa M. 2003. Quantification of carbon sequestration in soils following pasture to forest conversion in northwestern Ecuador. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4). DOI : 10.1029/2003GB002099
- Krull E.S., Baldock J.A., et Skjemstad J.O. 2003. Importance of mechanisms and processes of the stabilisation of soil organic matter for modelling carbon turnover. *Functional Plant Biology*, 30(2). DOI : 10.1071/FP02085
- Leblanc H.A., McGraw R.L., et Nygren P. 2007. Dinitrogen-fixation by three neotropical agroforestry tree species under semi-controlled field conditions. *Plant and Soil*, 291(1-2). DOI : 10.1007/s11104-006-9186-0
- Lenth R.V. 2016. Least-Squares Means: The R Package lsmeans. *Journal of Statistical Software*, 69(1), p. 1-33.
- Lyu M., Nie Y., Giardina C.P., Vadeboncoeur M.A., Ren Y., Fu Z., Wang M., Jin C., Liu X., et Xie J. 2019. Litter quality and site characteristics interact to affect the response of priming effect to temperature in subtropical forests. *Functional Ecology*, 33(11). DOI : 10.1111/1365-2435.13428
- Martins M. dos R. et Angers D.A. 2015. Different plant types for different soil ecosystem services. *Geoderma*, 237-238. DOI : 10.1016/j.geoderma.2014.09.013
- Michalet S., Rohr J., Warshan D., Bardon C., Roggy J.-C., Domenach A.-M., Czarnes S., Pommier T., Combourieu B., Guillaumaud N., Bellvert F., Comte G., et Poly F. 2013. Phytochemical analysis of mature tree root exudates in situ and their role in shaping soil microbial communities in relation to tree N-acquisition strategy. *Plant Physiology and Biochemistry*, 72. DOI : 10.1016/j.plaphy.2013.05.003
- Minasny B., Malone B.P., et McBratney A.B. 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, p. 59-86.
- Nottingham A.T., Turner B.L., Stott A.W., et Tanner E.V.J. 2015. Nitrogen and phosphorus constrain labile and stable carbon turnover in lowland tropical forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 80. DOI : 10.1016/j.soilbio.2014.09.012
- Nygren P., Leblanc H.A., Lu M., et Gómez Luciano C.A. 2013. Distribution of coarse and fine roots of *Theobroma cacao* and shade tree *Inga edulis* in a cocoa plantation. *Annals of Forest Science*, 70(3). DOI : 10.1007/s13595-012-0250-z
- Ouedraogo J., Ouedraogo É., et Nacro H.B. 2017. La macrofaune du sol améliore l'efficacité de l'utilisation de l'énergie par les microorganismes. *Journal of Applied Biosciences*, 114(1). DOI : 10.4314/jab.v114i1.8
- Parry S., Renault P., Chadœuf J., Chenu C., et Lensi R. 2000. Particulate organic matter as a source of variation in denitrification in clods of soil: Variation in denitrification in soil clods. *European Journal of Soil Science*, 51(2). DOI : 10.1046/j.1365-2389.2000.00298.x
- Paterson E., Midwood A., et Millard P. 2009. Through the eye of the needle: a review of isotope approaches to quantify microbial processes mediating soil carbon balance. *New Phytologist*, 184, p. 19-33.

- Philippot L., Spor A., Hénault C., Bru D., Bizouard F., Jones C.M., Sarr A., et Maron P.-A. 2013. Loss in microbial diversity affects nitrogen cycling in soil. *The ISME Journal*, 7(8). DOI : 10.1038/ismej.2013.34
- Powers J.S. et Schlesinger W.H. 2002. Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northeastern Costa Rica. *Geoderma*, 109(3-4). DOI : 10.1016/S0016-7061(02)00147-7
- Qiao N., Schaefer D., Blagodatskaya E., Zou X., Xu X., et Kuzyakov Y. 2014. Labile carbon retention compensates for CO₂ released by priming in forest soils. *Global Change Biology*, 20(6). DOI : 10.1111/gcb.12458
- R Core Team. 2020. R: *A language and environment for statistical computing*. Vienna : R Foundation for Statistical Computing Disponible sur : <https://www.R-project.org/>
- Rui Y., Murphy D.V., Wang X., et Hoyle F.C. 2016. Microbial respiration, but not biomass, responded linearly to increasing light fraction organic matter input: Consequences for carbon sequestration. *Scientific Reports*, 6(1). DOI : 10.1038/srep35496
- Russell V. Lenth. 2021. *emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means*. Disponible sur : <https://cran.r-project.org/web/packages/emmeans/index.html>
- Schenk H.J. et Jackson R.B. 2002. The global biogeography of roots. *Ecological Monographs*, 72(3). DOI : 10.1890/0012-9615(2002)072[0311:TGBOR]2.0.CO;2
- Schimann H., Petit-Jean C., Guitet S., Reis T., Domenach A.M., et Roggy J.-C. 2012. Microbial bioindicators of soil functioning after disturbance: The case of gold mining in tropical rainforests of French Guiana. *Ecological Indicators*, 20. DOI : 10.1016/j.ecolind.2012.01.021
- Shirato Y., Jomura M., Wagai R., Kondo M., Tanabe K., et Uchida M. 2013. Deviations between observed and RothC-simulated $\Delta^{14}\text{C}$ values despite improved IOM initialization: Deviations between observed and RothC-simulated $\Delta^{14}\text{C}$. *European Journal of Soil Science*, 64(5). DOI : 10.1111/ejss.12075
- Sierra C. 2015. *Run the RothC model for a site*. Disponible sur : <https://www.bgc-jena.mpg.de/TEE/basics/2015/11/19/RothC/>
- Sierra C., Markus M., et TRumbore S.E. 2012. Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0. *Geoscientific Model Development*, 5(4), p. 1045-1060.
- Six J., Callewaert P., Lenders S., De Gryze S., Morris S.J., Gregorich E.G., Paul E.A., et Paustian K. 2002. Measuring and Understanding Carbon Storage in Afforested Soils by Physical Fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6). DOI : 10.2136/sssaj2002.1981
- Six J., Conant R.T., Paul E.A., et Paustian K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. 241, p. 22.
- Stahl C., Freycon V., Fontaine S., Dezécache C., Ponchant L., Picon-Cochard C., Klumpp K., Soussana J.-F., et Blanfort V. 2016. Soil carbon stocks after conversion of

- Amazonian tropical forest to grazed pasture: importance of deep soil layers. *Regional Environmental Change*, 16(7). DOI : 10.1007/s10113-016-0936-0
- Voisin A.-S., Cellier P., et Jeuffoy M.-H. 2015. Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines : Impacts Agronomiques et Environnementaux. *Innovations Agronomiques*, 43, p. 139-160.
- Weihermüller L., Graf A., Herbst M., et Vereecken H. 2013. Simple pedotransfer functions to initialize reactive carbon pools of the RothC model: Reactive C and pedotransfer functions. *European Journal of Soil Science*, 64(5). DOI : 10.1111/ejss.12036
- Zinn Y.L., Lal R., et Resck D.V.S. 2005. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*, 127(1-2). DOI : 10.1016/j.geoderma.2005.02.010

7. LISTE DES ABRÉVIATIONS

C : Carbone

CARPAG : CARbone des PATûrages de Guyane et gaz à effet de serre

CUE : *Carbon Use Efficiency*, efficacité d'utilisation du carbone

DEA : *Denitrifying Enzymatic Activity*, Dénitrification potentielle

FEDER : Fond Européen pour le Développement Rural

FAO : *Food and Agriculture Organization*, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

MBC : *Microbial Biomass Carbon*, Carbone de la biomasse microbienne

MiOS : Micro-Organismes du Sol

MO : Matière Organique

N : Azote

QM : Quotient Microbien

qCO₂ : Quotient respiratoire journalier

SIR : *Substrate Induced Respiration*, Respiration potentielle

TMG : Taux de Minéralisation Global

USDA : *United States Department of Agriculture*, Département de l'Agriculture des Etats-Unis

8. TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Texture des parcelles étudiées	12
Tableau 2 : Évolution attendue des indicateurs entre les types de parcelle	17
Tableau 3 : Moyennes ajustées par la teneur en argile des stocks de C pour nos deux premiers horizons de référence réunis (teneur en argile de 39,4%)....	28
Tableau 4 : Surface des parcelles étudiées	49
Tableau 5 : Données ayant servies à faire la Figure 25 (moyenne \pm erreur standard).....	51
Tableau 6 : Répartition du stock de carbone entre les réservoirs théoriques de RothC	63
Tableau 7 : Données utilisées pour la Erreur ! Source du renvoi introuvable.	73
Tableau 8 : Données utilisées pour la Figure 10.....	73
Tableau 9 : Données utilisées pour la Figure 11.....	73
Tableau 10 : Données utilisées pour la Figure 12	73
Tableau 11 : Données utilisées pour la Figure 13	74
Tableau 12 : Données utilisées pour la Figure 14	74
Tableau 13 : Données utilisées pour la Figure 15	74
Tableau 14 : Données utilisées pour Figures 16	74
Tableau 15 : Données utilisées pour la Figure 34 (moyenne \pm erreur standard)	77
Tableau 16 : Données utilisées pour la Figure 35 (moyenne \pm erreur standard)	77
Tableau 17 : Coefficient de détermination de la relation linéaire entre le stock de carbone corrigé et la teneur en argiles ou argiles plus limons.....	78
Tableau 18 : Données pour les Figure 17 et Figure 36 (moyenne \pm erreur standard).....	79
Tableau 19 : Statistiques utilisées pour les Figure 17 et Figure 36 (p-values)	79
Tableau 20 : Données utilisées pour la Figure 37 (moyenne \pm erreur standard)	81
Tableau 21 : Données pour les Figure 18 et Figure 38 (moyenne \pm erreur standard).....	82
Tableau 22 : Statistiques utilisées pour les Figure 18 et Figure 38 (p-values)	82

9. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Limites utilisées le plus souvent en France pour les classes granulométriques des matériaux altérés de minéraux (de Forges <i>et al.</i> , 2008)	7
Figure 2 : Types de matière organique présents dans le sol (Basile-Doelsch <i>et al.</i> , 2020)	8
Figure 3 : Cycle du carbone dans le sol.....	8
Figure 4 : Les différentes voies de protection de la matière organique du sol (adaptée de Six <i>et al.</i> , 2002)	9
Figure 5 : Position du site d'étude et de son contexte (géoportail.fr, googlemaps.fr).....	11
Figure 6 : Photo du marteau piqueur monté sur la gouge à gauche, photo du système d'extraction de la gouge à droite (photos personnelles)	13
Figure 7 : Photo d'une carotte extraite de la parcelle forêt (photo personnelle).	13
Figure 8 : Schéma explicatif de la correction massique	18
Figure 9 : Biomasse microbienne vivante par type de parcelle (données Tableau 7)	21
Figure 10 : Ratio DEA/SIR corrigé par type de parcelle (données Tableau 8).....	22
Figure 11 : Quotient respiratoire journalier par type de parcelle (données Tableau 9)	22
Figure 12 : Quotient microbien par type de parcelle (données Tableau 10)	23
Figure 13 : Taux de minéralisation global par type de parcelle (données Tableau 11).....	23
Figure 14 : Répartition des stocks bruts de carbone et d'azote sur un mètre (données Tableau 12).....	24
Figure 15 : Évolution de la masse de terre fine de référence avec la profondeur (données Tableau 13).....	25
Figures 16 : Évolution des teneurs corrigées en carbone et en azote de la terre fine avec la profondeur (données Tableau 14)	25
Figure 17 : Moyennes ajustées des stocks de carbone pour l'ensemble de la carotte (gauche) et pour l'horizon 1 (droite).....	26
Figure 18 : Moyennes ajustées des stocks d'azote pour l'ensemble de la carotte (gauche) et pour l'horizon 3 (droite).....	27
Figure 19 : Évolution des apports mensuels de carbone prédits pour la parcelle plantée.....	28
Figure 20 : Évolution des apports de carbone simulés en fonction du stock avant plantation	29
Figure 21 : Évolution du stock de carbone dans les premiers 0.25 t/m ² en fonction du temps.....	29
Figure 22 : Évolution des stocks de carbone simulés en fonction du stock de carbone avant plantation	30
Figure 23 : Évolution des stocks de carbone simulés en fonction des apports asymptotiques de carbone	30
Figure 24 : Structure diamétrique des parcelles plantées.....	50
Figure 25 : Triangle de texture USDA avec la position des parcelles étudiées	51
Figure 26 : Réactions de dénitrification	54

Figure 27 : Schéma explicatif de la correction massique	56
Figure 28 : Estimation de l'évolution de la teneur en carbone avec la profondeur.....	58
Figure 29 : Réservoirs théoriques de matière organique utilisés dans RothC (d'après Shirato <i>et al.</i> , 2013)	61
Figure 30 : Évolution du stock de carbone sous forêt vers stabilisation.....	62
Figure 31 : Évolution du stock de carbone du sol sans apport de matière organique	63
Figure 32 : Photo d'un <i>litter trap</i> (photo personnelle)	64
Figure 33 : Évolution type des caractéristiques des couches successives de sol (d'après Ellert <i>et al.</i> (2002)	75
Figure 34 : Texture non corrigée par parcelle et par horizon.....	76
Figure 35 : Texture corrigée par parcelle et par horizon	76
Figure 36 : Stocks de carbone par horizon, corrigés et ajustés	79
Figure 37 : Comparaison des stocks de carbone en fonction des modifications effectuées	80
Figure 38 : Stocks d'azote par horizon, corrigés et ajustés.....	82

10. TABLE DES ÉQUATIONS

Équation 1 : La masse de carbone contenu dans les micro-organismes en fonction de la respiration potentielle (d'après Anderson et Domsch., 1978)	15
Équation 2 : Ratio DEA-SIR corrigé	15
Équation 3 : le quotient respiratoire journalier (d'après Ouedraogo et al., (2017))	16
Équation 4 : Le quotient microbien (d'après Rui <i>et al.</i> (2016))	16
Équation 5 : Le taux de minéralisation globale (adapté de Ouedraogo et al. (2017))	16
Équation 6 : Stock de carbone par horizon (adaptée de Poeplau et al., 2017)	17
Équation 7 : Évolution théorique des apports de carbone en fonction du temps pour la parcelle plantée : fonction de Michaelis-Menten	19
Équations 8 : Stock de carbone en fonction de la masse d'argiles	27
Équation 9 : Masse de terre fine de l'horizon 1 à aller prélever/attribuer dans/à l'horizon 2.....	56
Équation 10 : Masse de carbone par carotte non corrigée et par horizon ...	57
Équation 11 : Masse de carbone par carotte corrigée pour l'horizon 1	57
Équation 12 : Masse de carbone par carotte corrigée pour l'horizon 2	57
Équation 13 : Masse de carbone par carotte corrigée pour l'horizon 3	57
Équation 14 : Stock de carbone corrigé par horizon.....	58
Équation 15 : Équation de pédotransfert pour initialiser le réservoir IOM (en tonnes) (d'après Falloon et al, 1998)	62
Équation 16 : Équation de pédotransfert pour initialiser les réservoirs actifs de RothC (en tonnes) (d'après Wheihermüller et al., 2013).....	62
Équation 17 : Masse racinaire en fonction du diamètre basal chez <i>I. edulis</i> (Nygren et al., 2013).....	64

11. ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

Table des Annexes.....	46
Annexe 1 : Molécules de matière organique et réservoirs associés	47
Annexe 2 : <i>Priming effect</i>	48
Annexe 3 : Localisation des parcelles étudiées.....	49
Annexe 4 : Structure diamétrique des parcelles plantées	50
Annexe 5 : Triangle de texture avec la position des parcelles étudiées	51
Annexe 6 : Protocole de carottage et conditionnement des échantillons....	52
Annexe 7 : Respirations potentielle et semi-potentielle.....	53
Annexe 8 : Dénitrification potentielle	54
Annexe 9 : Méthodologie de la correction massique.....	55
Annexe 10 : Script R utilisé pour la correction massique	60
Annexe 11 : Présentation du modèle RothC et initialisation	61
Annexe 12 : Présentation du dispositif pour estimer les apports de carbone sur la parcelle plantée	64
Annexe 13 : Résumé des données brutes utilisées	66
Annexe 14 : Fonction R utilisée pour la comparaison des moyennes des activités microbiennes (modèle linéaire mixte).....	70
Annexe 15 : Fonction R utilisée pour la comparaison des stocks ajustés (modèle linéaire à deux variables)	71
Annexe 16 : Script R utilisé pour modéliser l'évolution des stocks de carbone avec RothC.....	72
Annexe 17 : Données utilisées pour les différentes figures.....	73
Annexe 18 : Évolution type des caractéristiques des couches successives de sol	75
Annexe 19 : Texture non corrigée et corrigée par type et par horizon.....	76
Annexe 20 : Tableau utilisé pour l'étude des ajustements possibles pour les stocks	78
Annexe 21 : Stocks de carbone par horizon, corrigés et ajustés	79
Annexe 22 : Comparaison des stocks de carbone en fonction des corrections effectuées	80
Annexe 23 : Stocks d'azote par horizon, corrigés et ajustés	82

ANNEXE 1 : MOLÉCULES DE MATIÈRE ORGANIQUE ET RÉSERVOIRS ASSOCIÉS

Voici une compartimentation possible du carbone dans les sols :

- Les carbohydrates (cellulose principalement) sont facilement hydrolysés par les enzymes des MiOS. Le turnover associé est en mois voire en années. On qualifie ce réservoir d'« actif » ou de « labile » (Krull *et al.*, 2003).
- Les alkyles (les lipides, polyesters insolubles et des macromolécules synthétisées par les MiOS) sont plus difficilement attaqués de par leurs structures polymérisées et réticulées. Les lignines, faisant partie de cette catégorie, sont particulièrement résistantes (et présentes) car peu de MiOS ont les enzymes nécessaires à leur dépolymérisation. Le turnover associé est en dizaines à centaines d'années. On qualifie ce réservoir de « stable » ou « passif » (Krull *et al.*, 2003).
- Les charbons de bois sont les molécules de MO considérées comme les plus durables à cause de leur structure condensée et leur forte aromaticité (couches superposées d'unités poly-aromatiques). On ne parle plus de turnover car les MiOS ne sont pas capables de les dégrader. Une grande partie de ces charbons se trouve sous forme fine inférieure à 50 µm, sensible à l'érosion. On parle alors de temps de résidence qui est de l'ordre de 5 000 à 10 000 ans. Ce réservoir est qualifié d'« inerte » (Krull *et al.*, 2003).

Retour p. 9

ANNEXE 2 : PRIMING EFFECT

Le *priming effect* peut s'expliquer par deux mécanismes, potentiellement co-existants et se basant sur l'interaction entre deux groupes fonctionnels de microorganismes, les stratégies r et les stratégies K :

- Les enzymes extracellulaires produites par les r-stratégues pour décomposer la MO fraîche apportée au sol peuvent également décomposer la partie la plus accessible et la plus jeune de la MO stable (Lyu *et al.*, 2019).
- Après l'épuisement de la fraction labile de la MO fraîche par les r-stratégues et le déclin de leur activité, les K-stratégues minéralisent la part polymérisée de la MO fraîche. Cette MO fraîche leur apporte l'énergie nécessaire pour décomposer la MO stable beaucoup plus réfractaire et ainsi aller chercher les nutriments azotés (Nottingham *et al.*, 2015) et phosphorés (Lyu *et al.*, 2019) nécessaires à leur synthèse et leur activité.

Retour p.9

ANNEXE 3 : LOCALISATION DES PARCELLES ÉTUDIÉES



Tableau 4 : Surface des parcelles étudiées

Parcelle	Surface (ha)
E	0,085
F	0,230
G	0,050
Plantée	0,365
Témoin	0,075
Forêt	0,11

Retour p. 11

ANNEXE 4 : STRUCTURE DIAMÉTRIQUE DES PARCELLES PLANTÉES

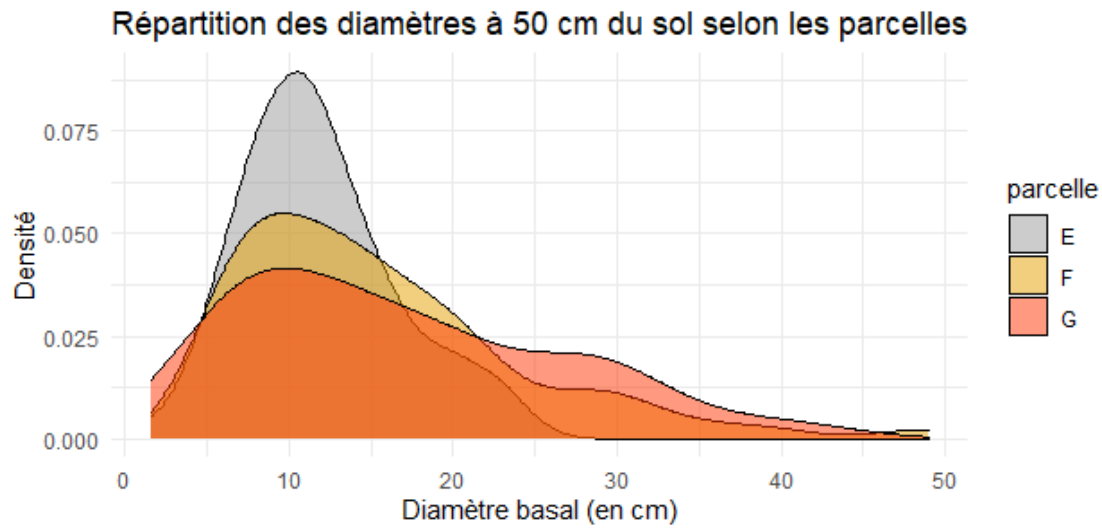


Figure 24 : Structure diamétrique des parcelles plantées

[Retour p. 11](#)

ANNEXE 5 : TRIANGLE DE TEXTURE AVEC LA POSITION DES PARCELLES ÉTUDIÉES

Triangle adopté par l'*United States Department of Agriculture* (USDA)

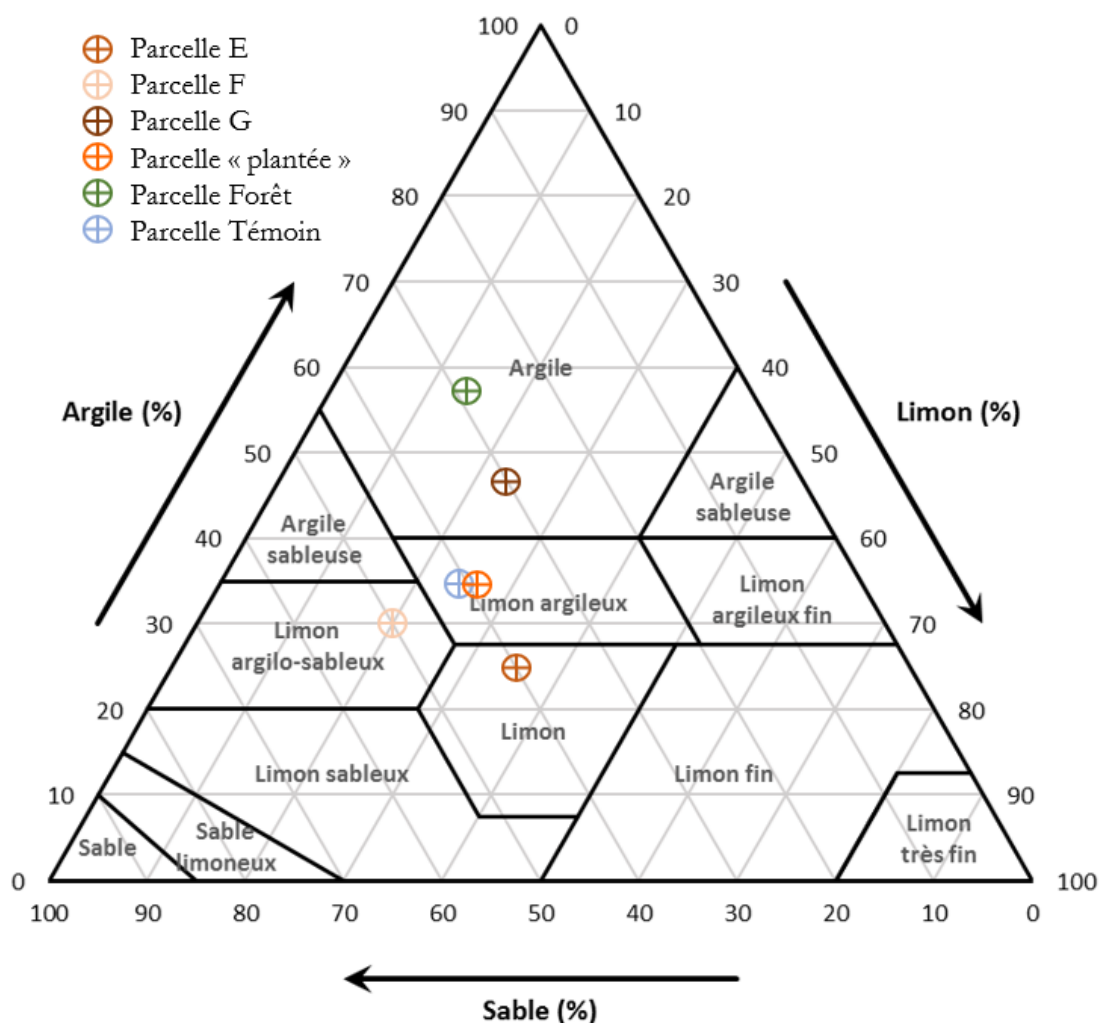


Figure 25 : Triangle de texture USDA avec la position des parcelles étudiées

Tableau 5 : Données ayant servies à faire la Figure 25 (moyenne \pm erreur standard)

Pourcentage de texture	Argiles	Limons	Sables
Parcelle E	25,4 \pm 3,1	34,1 \pm 3,3	40,5 \pm 4,6
Parcelle F	30,1 \pm 4,5	19,4 \pm 0,8	50,4 \pm 4,8
Parcelle G	47,1 \pm 3,4	22,9 \pm 0,7	30,1 \pm 3,3
Parcelle « plantée »	34,2 \pm 2,5	25,5 \pm 1,4	40,3 \pm 2,7
Parcelle Forêt	58,2 \pm 1,2	12,9 \pm 0,8	28,9 \pm 1,7
Parcelle Témoin	34,1 \pm 1,6	23,8 \pm 1,3	42,0 \pm 0,9

Retour p. 12

ANNEXE 6 : PROTOCOLE DE CAROTTAGE ET CONDITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS

Il faut veiller à ce que la gouge s'enfonce bien droit pour ne pas induire de biais, vérification qui était faite par un observateur dans deux directions perpendiculaires. Si jamais la gouge avait du mal à s'enfoncer car une pierre en bloquait l'entrée, qu'une racine avait vidé en partie la carotte par les ouvertures latérales ou qu'une partie trop importante (plus de 20 centimètres) de la carotte était tombée lors de la remontée alors le prélèvement été renouvelé à proximité du premier.

Sur le terrain, les limites entre les horizons ont été positionnées à l'aide d'un mètre ruban. Lorsque la carotte était tassée c'est-à-dire lorsque la gouge était rentrée d'un mètre dans le sol mais que la carotte faisait moins d'un mètre au final, le tassement a été réparti en considérant que celui-ci était le même tout au long du profil. Par exemple, pour une carotte de 97 centimètres donc pour 3 centimètres de tassement nous avons décidé que l'horizon 1 faisait 19,4 centimètres, l'horizon 2, 29,1 centimètres et l'horizon 3, 48,5 centimètres. Il y a peu de chances que le tassement se répartisse de manière parfaitement homogène le long du profil mais notre hypothèse est suffisamment simple pour être mise en œuvre sur le terrain. Une fois la séparation faite, chaque horizon est retiré successivement de la gouge et placé dans un sachet hermétique. La gouge était lavée au besoin avant de recommencer un prélèvement.

Retour p. 13

ANNEXE 7 : RESPIRATIONS POTENTIELLE ET SEMI-POTENTIELLE

D'après (Coulin, 2021b)

La respiration potentielle est la respiration des MiOS en condition non limitantes d'humidité et de nutriments carbonés. En pratique, 20 grammes de sol (tamisés à 2 millimètres et séchés à l'air libre pendant 48 heures) sont placés dans un tube à plasma et humidifiés à 80% de la capacité au champ avec une solution contenant du glucose pour un apport de 0,05 grammes de glucose par tube. Le tube est ensuite hermétiquement scellé et placé pendant une heure à l'étuve à 27°C. Au bout d'une heure un prélèvement de 200 microlitres est analysé par un chromatographe en phase gazeuse (VARIAN 4900-CP, Les Ulis, France) et la teneur en CO₂ est récupérée. Cette mesure est répétée quatre heures après.

La respiration basale (semi-potentielle) est mesurée selon le même procédé hormis qu'au lieu d'humidifier avec une solution de glucose diluée le sol est réhumidifié avec de l'eau distillée.

Retour p. 14

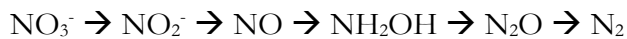
ANNEXE 8 : DÉNITRIFICATION POTENTIELLE

D'après (Coulin, 2021a)

La dénitrification potentielle est la dénitrification (réduction des nitrates en diazote) réalisée par les MiOS en conditions anaérobie et non limitantes d'humidité, de nutriments carbonés et azotés. En pratique, 20 grammes de sol (tamisés à 2 millimètres et séchés à l'air libre pendant 48 heures) sont placés dans un tube à plasma et humidifiés à 100% de la capacité au champ avec une solution contenant du glucose (apport de 0,05 grammes par tube), du glutamate monopotassique (apport de 0,068 grammes) et du nitrate de potassium (apport de 0,007 grammes). Le tube est fermé hermétiquement. Un vide est réalisé avec un mélange de 90% d'Hélium et 10% d'acétylène. Le tube est ensuite placé à l'étuve à 27°C. Une heure après l'ajout de la solution un prélèvement de 200 microlitres est analysé par un chromatographe en phase gazeuse (VARIAN 3800-CP, Les Ulis, France) et les teneurs en CO₂ et en N₂O sont récupérées. Cette mesure est répétée quatre heures après.

L'acétylène introduit dans le tube permet de bloquer la chaîne de dénitrification à la dernière étape, stoppant la chaîne à la production de N₂O.

Figure 26 : Réactions de dénitrification



L'intérêt de bloquer la chaîne à cette étape est que le N₂O n'est pas (ou très peu, moins d'un ppm) présent dans l'atmosphère alors que le N₂ est très présent (78%). En cas de vide imparfait ou de micro fuite dans le tube la présence de N₂ atmosphérique induirait un gros bruit.

Retour p. 14

ANNEXE 9 : MÉTHODOLOGIE DE LA CORRECTION MASSIQUE

Pour pouvoir comparer les stocks horizon par horizon il est nécessaire d'appliquer certaines corrections à ces stocks. En effet, pour les stocks bruts le raisonnement est à volume constant. Cependant, en considérant le tassement non homogène dans l'espace (ce qui est le cas pour des pratiques agricoles différentes ou pour des végétations différentes), cela induit des difficultés pour comparer les stocks entre eux. Dans cette étude, il est possible que la plantation ait eu pour effet de décompacter les sols. En effet, les racines, en se développant, occupent un certain volume dans le sol, ce qui fait remonter celui-ci. Une fois les racines retirées lors du tamisage pour préparer nos échantillons ou lorsque celle-ci meurent c'est autant de volume qui n'est plus occupé par du sol. Cela induit une baisse de la quantité de terre par unité de volume par rapport à une situation sans racine. De plus, dans cette étude il y a une différence importante de la quantité d'éléments grossiers entre les parcelles (témoin $8,5 \pm 0,94$ %, plantée $39 \pm 2,8$ % et forêt $15 \pm 2,1$ %). Raisonner à volume constant revient dans notre cas à comparer des éléments qui ne sont pas comparables.

Une correction massique a alors été réalisée comme dans Ellert *et al.* (2002) ou Gifford et Roderick (2003). Cette correction consiste à ne plus raisonner à volume constant mais à masse de terre fine constante. Cette correction est double, corrigeant la présence d'éléments grossiers et à la différence de compaction des sols. Une situation de référence doit être fixée. La parcelle F (appartenant aux parcelles du type plantées) a été choisie car c'est la parcelle ayant le moins de terre fine. Cela permet de ne pas faire de supposition sur la composition du sol au-delà d'un mètre. En effet, dans ces conditions, la correction massique consiste à retirer de la terre fine dans la plupart des cas. Prendre comme référence la parcelle ayant le plus de terre fine impliquerait de rajouter de la terre fine aux autres parcelles et cela aurait induit d'augmenter artificiellement la taille de l'horizon 3 et donc de supposer les propriétés du sol sous cet horizon. De plus, les parcelles plantées sont à proximité de petits cours d'eau. Dans deux forages nous avons constaté un engorgement autour de 80 centimètres de profondeur. Faire des suppositions sur la composition du sol au-delà d'un mètre semble très hasardeux sur ces parcelles.

Une masse de terre fine de référence par horizon a ensuite été déterminée comme la moyenne de la terre fine par horizon pour la parcelle F.

La correction massique est réalisée horizon par horizon en commençant par l'horizon de surface.

La Figure 27 résume visuellement la correction massique.

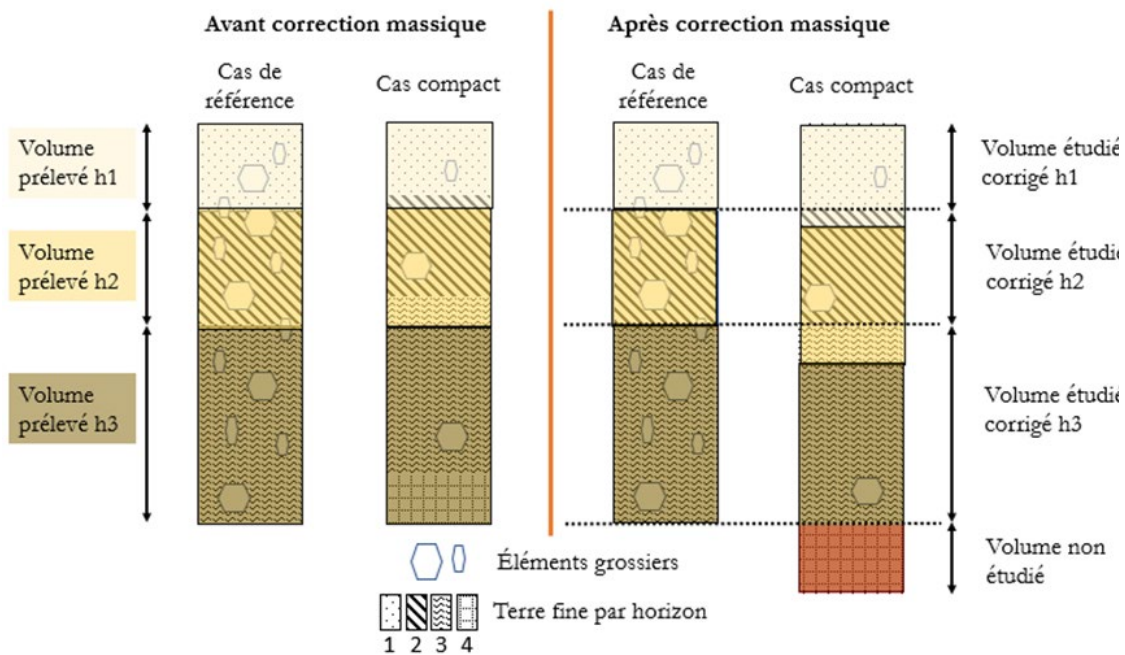


Figure 27 : Schéma explicatif de la correction massique

Sur la Figure 27 les couleurs représentent les volumes prélevés par échantillon. Les motifs de remplissage représentent la quantité de terre fine contenue dans les horizons de référence. Choisir comme référence le cas ayant le moins de terre fine revient à comparer des stocks de carbone plus faibles qu'avec une référence plus compacte (la partie rouge n'est pas prise en compte dans le calcul des stocks).

Mathématiquement cela se passe de la manière suivante, en partant de l'horizon 1. Il faut calculer ΔTF_1 , la différence entre la masse de terre fine de référence de l'horizon 1 et la masse de terre fine d'horizon 1 de l'échantillon étudié.

Équation 9 : Masse de terre fine de l'horizon 1 à aller prélever/attribuer dans/à l'horizon 2

$$\Delta TF_1 = m_{TF,ref1} - m_{TF,h1}$$

ΔTF_1 : masse de terre fine de l'horizon 1 à aller prélever/attribuer dans/à l'horizon 2 (en kg),

$m_{TF,ref1}$: masse de terre fine de référence pour l'horizon 1 (en kg) et $m_{TF,h1}$ la masse de terre fine de l'horizon 1 (en kg)

Si cette différence est positive alors l'horizon étudié contient moins de terre fine que l'horizon de référence, il faut donc lui en réattribuer. Dans le cas inverse, il faut lui en retirer.

Si ΔTF_1 est positive alors il faut rajouter de la terre fine à l'horizon 1. Celle-ci a été prise dans l'horizon 2, elle lui donc a été retirée et attribuée à l'horizon 1. Le stock de carbone associé (ΔTF_1 fois la teneur en carbone de la terre fine de l'horizon 2) a été ajouté à celui de l'horizon 1 et soustrait à l'horizon 2.

Si ΔTF_1 est négative alors il faut retirer de la terre fine de l'horizon 2. Celle-ci a été prise de l'horizon 1 et attribuée à l'horizon 2. Le stock de carbone associé (ΔTF_1 fois la teneur en

carbone de la terre fine de l'horizon 1) a été ajouté à celui de l'horizon 2 et soustrait à l'horizon 1.

Ces opérations sont répétées pour l'horizon 2 en calculant le ΔTF_2 avec la nouvelle de terre fine de l'horizon 2. Nous avons attribué/retiré de la terre fine et le stock de carbone associé de l'horizon 2 vers l'horizon 3.

Enfin le même protocole est appliqué à l'horizon 3. Si ΔTF_3 est négatif (c'est-à-dire que l'horizon 3 contient moins de terre fine que la référence) alors cette terre fine a été ajoutée avec les mêmes propriétés que l'horizon 3. Cela revient à faire des suppositions sur la composition de l'horizon sous l'horizon 3. Cela n'est pas trop arrivé dans cette étude étant donné que la référence a été choisie pour limiter cette situation.

Équation 10 : Masse de carbone par carotte non corrigée et par horizon

$$Masse\ nc_{C,hi} = m_{TF,hi} \times C_{C,TF,hi}$$

Masse nc_{C,hi} : masse de carbone par carotte non corrigée pour l'horizon i (en g de C)

m_{TF,hi} : masse de terre fine dans l'horizon i (en kg)

C_{C,TF,hi} : concentration en carbone de la terre fine de l'horizon i (en g de C. kg⁻¹ de terre fine).

Pour des raisons de simplicité d'écriture seulement le cas le plus simple, où chaque horizon contient plus de terre fine que sa référence (ΔTF négatif), est détaillé. Les autres cas ont été traités de manière analogue en suivant la méthodologie détaillée plus haut.

Équation 11 : Masse de carbone par carotte corrigée pour l'horizon 1

$$Masse\ cor_{C,h1} = Masse\ nc_{C,h1} + \Delta TF_1 \times C_{C,TF,h1}$$

Masse cor_{C,h1} : masse de carbone par carotte pour l'horizon 1 (en g de C)

Équation 12 : Masse de carbone par carotte corrigée pour l'horizon 2

$$Masse\ cor_{C,h2} = Masse\ nc_{C,h2} - \Delta TF_1 \times C_{C,TF,h1} + C_{C,TF,h2} \times \Delta TF_2$$

Masse cor_{C,h2} : masse de carbone par carotte pour l'horizon 2 (en g de C)

Équation 13 : Masse de carbone par carotte corrigée pour l'horizon 3

$$Masse\ cor_{C,h3} = Masse\ nc_{C,h3} - \Delta TF_2 \times C_{C,TF,h2} + \Delta TF_3 \times C_{C,TF,h3}$$

Masse cor_{C,h3} : masse de carbone par carotte pour l'horizon 3 (en g de C)

Le stock corrigé par horizon à l'échelle de la parcelle est obtenu en ramenant la moyenne des masses par carotte et par horizon corrigé à la surface de la parcelle.

Équation 14 : Stock de carbone corrigé par horizon

$$Stock\ cor_{C,hi} = \frac{10000}{S} \times Masse\ cor_{C,hi}(moyen)$$

$Stock\ cor_{C,hi}$: stock de carbone corrigée à l'échelle de la parcelle (en g de C. ha⁻¹)

S : surface de la carotte (en m²)

$Masse\ cor_{C,hi}(moyen)$: moyenne de la masse de carbone par carotte corrigée pour l'horizon i (en g de C).

Les horizons ne sont alors plus définis dans un référentiel volumique (profondeur) mais dans un référentiel massique (masse de terre fine considérée).

Plusieurs possibilités sont possibles pour la détermination de la teneur en carbone de la terre fine choisie pour le terme $C_{C,TF,hi}$, c'est-à-dire la teneur en carbone de la terre fine ajoutée à chaque horizon dans le cadre de la correction. La première possibilité est de choisir de prendre la teneur de l'horizon dans lequel la terre fine est prélevée. Ceci induit un biais dans la mesure du stock de carbone.

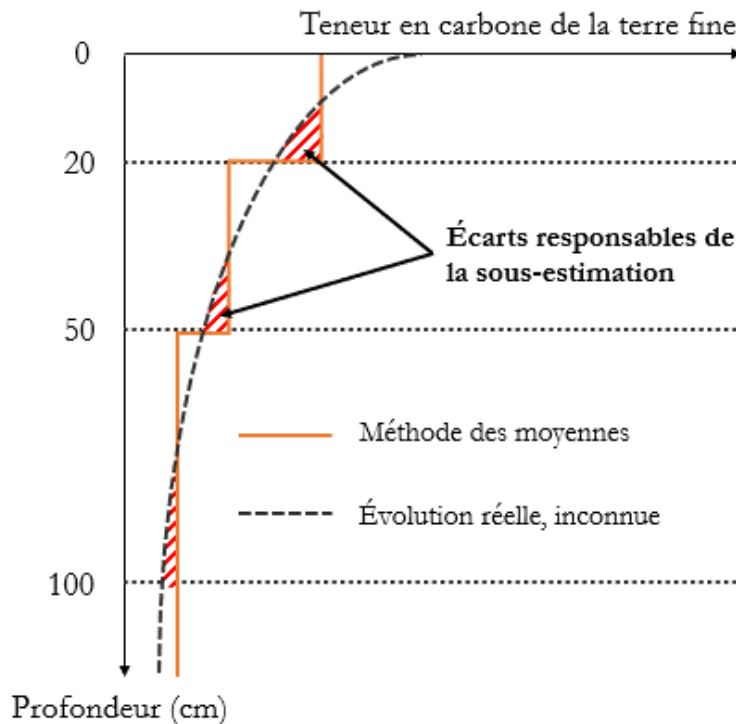


Figure 28 : Estimation de l'évolution de la teneur en carbone avec la profondeur

En effet, en considérant que la teneur en carbone évolue de manière non linéaire avec la profondeur (type fonction inverse dans le travail d'Ellert *et al.* (2002)), les stocks de carbone sont sous-estimés (Figure 28). En effet, dans cette étude, dans la plupart des cas la correction revient à retirer de la terre fine d'un horizon pour l'attribuer à l'horizon du dessous. La teneur en carbone choisie étant la moyenne de celle de l'horizon d'origine, celle-ci est plus importante (dans le cadre théorique) que la vraie teneur de celle-ci. Ceci est dû au fait que la teneur décroît avec la profondeur. La teneur moyenne correspond (à peu près) à la teneur de la terre fine à la moitié de l'horizon. La teneur de la partie basse de l'horizon

est donc (toujours dans le cadre théorique) inférieure à cette teneur moyenne. Le stock de carbone retiré de chaque horizon, dans le cadre de cette correction avec notre référence, est supérieur à la réalité. Le stock de carbone de chaque horizon est donc dans la plupart des cas diminué. Par analogie, à l'inverse, si la référence choisie est la parcelle avec le plus de terre fine, alors les stocks de carbone sont surestimés.

Un autre moyen serait d'évaluer l'évolution de la teneur de carbone en fonction de la masse considérée (référentiel massique) avec les trois points connus (un par horizon). Il faut alors faire le choix de la position de ces points (la valeur est pour le début de l'horizon, le milieu, la fin ?). Ceci induit des biais différents de la méthode précédente, probablement plus faibles, mais cette méthode n'est pas étudiée ici.

Les teneurs élevées en carbone et en azote dans les éléments grossiers (2 à 4 mm) n'ont pas influé sur la méthode appliquée. En effet, nous aurions pu estimer, avec la teneur en carbone de cette fraction grossière, la masse de terre fine attribuée à tort à la fraction grossière. Dans cette démarche la terre fine contenue dans les macroagrégats est supposée comme ayant la même teneur en carbone que la terre fine. Celle-ci est probablement égale voire supérieure car la MO contenue dans les agrégats est plus stable que lorsqu'elle est libre (Krull *et al.*, 2003). Dans cette étude, certains cas ont une fraction grossière avec une teneur en carbone supérieure à celle de la terre fine. Ces cas particuliers ne sont pas pris en compte dans cette méthode ce qui induit une sous-estimation des stocks de carbone.

Retour p. 18

ANNEXE 10 : SCRIPT R UTILISÉ POUR LA CORRECTION MASSIQUE

Le script qui suit a été simplifié pour ne corriger que les stocks de carbone. Le même principe est utilisé pour corriger les stocks d'azote, les teneurs en argiles et en limons.

```
```{r}
#mtref : colonne de la masse de terre fine de référence par horizon
#mtaux : copie de la colonne de la masse de terre fine par échantillon
et par horizon
#masse_c_cor : colonne de la masse corrigée de carbone, par échantillon
et par horizon
#masse_c : colonne de la masse de carbone non corrigée, par échantillon
et par horizon
#tc : colonne de la teneur en carbone de la terre fine
for (i in 0:30) {#31 étant le nombre de carottes que nous avons prélevées
 i1=(i)*3+1;i2=(i)*3+2;i3=(i)*3+3

 ### correction pour l'horizon 1
 dt1=data$mtref[i1]-data$mtaux[i1]
 if (dt1>0) { #s'il n'y a pas assez de terre fine par rapport à la référence
 data$masse_c_cor[i1]=data$masse_c[i1]+dt1*data$tc[i2]
 data$masse_c_cor[i2]=data$masse_c[i2]-dt1*data$tc[i2]
 } else { #s'il y en a trop
 data$masse_c_cor[i1]=data$masse_c[i1]+dt1*data$tc[i1]
 data$masse_c_cor[i2]=data$masse_c[i2]-dt1*data$tc[i1]
 }

 ### correction pour l'horizon 2
 #calcul d'une masse intermédiaire de terre fine contenue dans l'horizon 2,
 #après prélèvement/ajout pour corriger l'horizon 1
 data$mtaux[i2]=data$mtaux[i2]-dt1

 dt2=data$mtref[i2]-data$mtaux[i2]
 if (dt2>0) {
 data$masse_c_cor[i2]=data$masse_c_cor[i2]+dt2*data$tc[i3]
 data$masse_c_cor[i3]=data$masse_c[i3]-dt2*data$tc[i3]
 } else {
 data$masse_c_cor[i2]=data$masse_c[i2]+dt2*data$tc[i2]
 data$masse_c_cor[i3]=data$masse_c[i3]-dt2*data$tc[i2]
 }

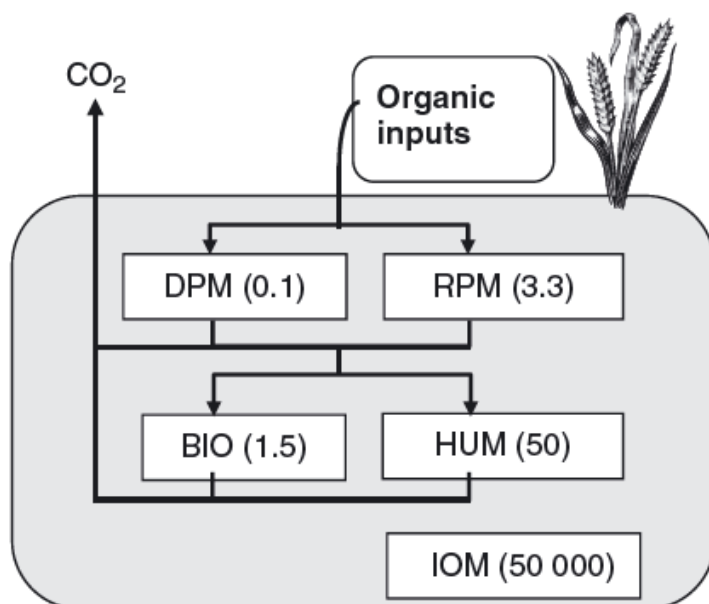
 #correction pour l'horizon 3
 #calcul d'une masse intermédiaire de terre fine contenue dans l'horizon 3,
 #après prélèvement/ajout pour corriger l'horizon 2
 data$mtaux[i3]=data$mtaux[i3]-dt2

 dt3=data$mtref[i3]-data$mtaux[i3]
 if (dt3>0) {
 data$masse_c_cor[i3]=data$masse_c_cor[i3]+dt3*data$tc[i3]
 } else {
 data$masse_c_cor[i3]=data$masse_c_cor[i3]+dt3*data$tc[i3]
 }
}
}]
```

Retour p. 18

## ANNEXE 11 : PRÉSENTATION DU MODÈLE ROTHC ET INITIALISATION

Le modèle RothC 26.3 (Coleman et Jenkinson, 1996) est un modèle qui permet de prédire l'évolution des stocks de carbone du sol en fonction de paramètres climatiques, de la composition du sol et des apports de carbone. Il est basé sur l'interaction de cinq réservoirs de MO théoriques (Figure 29).



Avec DPM la matière végétale décomposable, RPM la matière végétale résistante, BIO la biomasse microbienne, HUM la matière organique humifiée et IOM la matière organique inerte. Les chiffres entre parenthèses sont les temps moyens de résidence du carbone dans le réservoir.

Figure 29 : Réservoirs théoriques de matière organique utilisés dans RothC (d'après Shirato *et al.*, 2013)

Le compartiment IOM est isolé des autres et est considéré constant sur l'ensemble de la modélisation.

Les autres réservoirs sont interconnectés avec des transferts de MO et des pertes de CO<sub>2</sub>.

Il est considéré que dans chaque réservoir actif la MO est décomposée suivant une cinétique d'ordre 1 et des facteurs qui sont propres à chaque réservoir, dépendant notamment de la température, de la pluviométrie et de l'évapotranspiration.

Ce modèle a été utilisé dans le but de savoir dans combien de temps le stock de carbone sous la plantation atteindra celui de la forêt sur les 50 premiers centimètres. Pour cela les stocks après correction massique et après ajustement au taux d'argiles et, le taux d'argiles associé à cet ajustement, ont été utilisés.

Pour l'initialisation du modèle, la répartition du carbone organique entre les cinq réservoirs théoriques du modèle n'a pas pu être directement obtenue pour les parcelles plantées. En effet, Fujisaki (2014) propose une méthode qui ne s'applique que pour des sols dont le stock de carbone est à l'équilibre. Des équations de pédotransfert existent mais ne sont pas construites pour les milieux tropicaux (Weihermüller *et al.*, 2013).

Les apports de carbone qui permettent au stock sous la forêt de se maintenir dans le temps ont alors été estimés. Cela suppose que le stock de carbone sous la forêt est à l'équilibre, ce qui paraît être une hypothèse acceptable dans la mesure où la forêt n'est pas perturbée. Les équations de pédotransfert ont quand même été utilisées pour initialiser cette étape.

Pour IOM c'est l'équation de Falloon *et al.*, (1998) qui est utilisées :

Équation 15 : Équation de pédotransfert pour initialiser le réservoir IOM (en tonnes)  
(d'après Falloon et al, 1998)

$$IOM = 0,049 * Stock\ de\ C^{1,139}$$

Pour les réservoirs actifs, ce sont celles de Weihermüller *et al.*, (2013) qui sont utilisées :

Équation 16 : Équation de pédotransfert pour initialiser les réservoirs actifs de RothC (en tonnes) (d'après Weihermüller et al., 2013)

$$RPM = (0,1847 * Stock\ de\ C + 0,1555)(\% \ argiles + 1,2750)^{-0,1158} \quad R^2 = 0,99$$

$$HUM = (0,7148 * Stock\ de\ C + 0,5069)(\% \ argiles + 0,3421)^{0,0184} \quad R^2 = 0,99$$

$$BIO = (0,0140 * Stock\ de\ C + 0,0075)(\% \ argiles + 8,8473)^{0,0567} \quad R^2 = 0,99$$

$$DPM = SOC - (RPM + HUM + BIO + IOM)$$

% argiles : pourcentage d'argiles dans le sol étudié

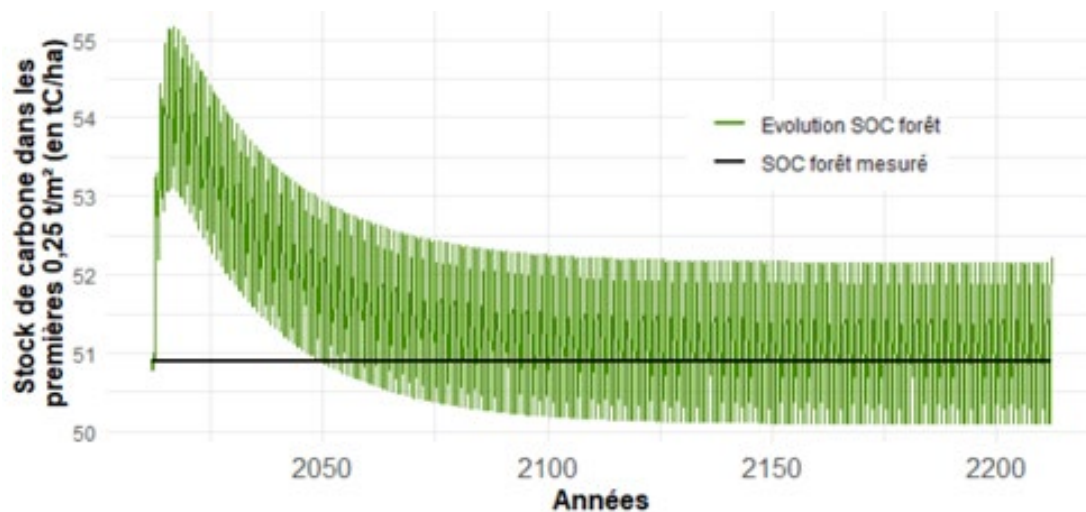


Figure 30 : Évolution du stock de carbone sous forêt vers stabilisation

La valeur des apports de C permettant au stock sous la forêt d'être stable est 10,1 tC.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Figure 30). Les stocks de C mesurés dans l'étude sont considérés comme être les stocks moyens sur l'année. Le temps nécessaire à la stabilisation semble être dû à la stabilisation de la répartition du carbone entre les différents réservoirs, l'initialisation faite ne correspondant pas à l'équilibre.

Le stock de carbone présent juste avant la plantation et la répartition de celui-ci entre les cinq réservoirs ont ensuite été estimés. Pour cela l'évolution du stock de carbone lorsque la forêt a été retirée a été modélisée en faisant fonctionner RothC sans apport de carbone et pour un sol à nu en partant de la répartition du carbone obtenu pour la forêt.

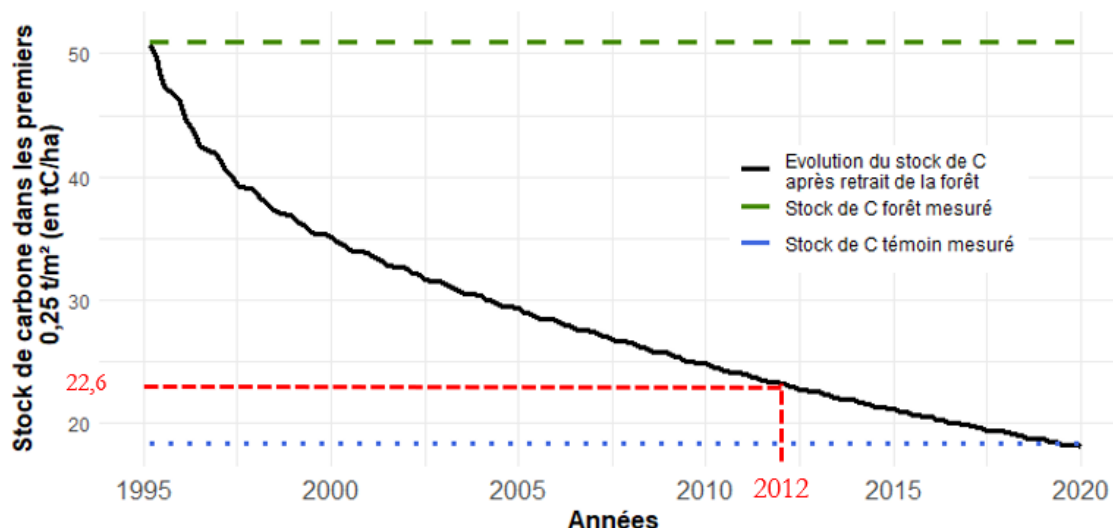


Figure 31 : Évolution du stock de carbone du sol sans apport de matière organique

Au bout de 25 ans le stock mesuré sur la parcelle témoin (Figure 31) est atteint. Le stock huit ans avant est alors le stock de carbone juste avant la plantation et permet d’obtenir sa répartition entre les différents réservoirs. Un stock de 22,6 tC.ha<sup>-1</sup> a été obtenu.

Voici les répartitions obtenues entre les cinq réservoirs théoriques à chaque étape :

Tableau 6 : Répartition du stock de carbone entre les réservoirs théoriques de RothC

Stock de C (tC.ha <sup>-1</sup> )	DPM	RPM	BIO	HUM	IOM	Total
Avant plantation	0	0	0,07	18,2	4,3	22,6
Témoin en 2020	0	0	0,05	14,0	4,3	18,3
Plantée en 2020	0,072	6,76	0,49	16,3	4,3	28,0
Plantée en 2200	0,11	11,7	0,89	33,7	4,2	50,7
Forêt	0,13	12,1	0,92	34,8	4,3	52,2

Retour p. 18

## ANNEXE 12 : PRÉSENTATION DU DISPOSITIF POUR ESTIMER LES APPORTS DE CARBONE SUR LA PARCELLE PLANTÉE

Pour avoir un modèle RothC le plus fidèle possible, une étude des apports de carbone par la litière et les racines est en cours sur la parcelle plantée.

### Apports aériens :

Pour estimer les apports de carbone aériens des *litter traps* ont été mis en place. Ceux-ci sont constitués d'un anneau en fil de fer de 50 centimètres de diamètre dans lequel est placé un brise-vue pour former une « époussette » comme sur la figure Figure 32.



Figure 32 : Photo d'un *litter trap* (photo personnelle)

Celui-ci est maintenu à au moins un mètre du sol par trois ficelles tendues à trois arbres à proximité. Ces *litter traps* vont capter la litière tombant des arbres. Il y en a dix par parcelle. Tous les mois ces pièges à litière sont vidés et la masse de litière contenue pesée. Ces relevés se feront sur une année complète.

### Apports racinaires :

Le modèle de Nygren *et al.* (2013) sera utilisé pour estimer la biomasse racinaire. Ce modèle a été réalisé dans un contexte agroforestier, ce qui pourrait entraîner une sur estimation du volume racinaire. En effet, en contexte agroforestier les arbres sont plantés à des densités bien plus faibles (123 contre 2 000 à Saint-Élie) ce qui induit une plus faible compétition entre les arbres.

Ce modèle a été mis au point pour *I. edulis* au Costa Rica en utilisant le modèle FracRoot (modèle de répartition théorique des racines par relation mère-fille, développé par les mêmes auteurs) couplé à des données d'excavation racinaires de ces mêmes arbres. La relation obtenue dans l'étude est l'équation Équation 17.

Équation 17 : Masse racinaire en fonction du diamètre basal chez *I. edulis* (Nygren et al., 2013)

$$m_{\text{racines}} = 0.03562 \times D_{\text{basal}}^2 \quad R^2 = 0.80$$

$m_{\text{racines}}$  : masse de racines pour un arbre (en kg)

$D_{\text{basal}}$  : diamètre du tronc à 50 centimètres du sol (en cm).

Les diamètres de tous les *I. edulis* présents sur les parcelles plantées ont été mesurés. Ces diamètres ont été mesurés à 50 centimètres du sol si l'insertion de la première branche se faisait plus haut ou au diamètre avant l'insertion de la première branche si celle-ci s'insérait avant 50 centimètres.

L'exsudation racinaire, qui peut atteindre jusqu'à dix pourcents de la production primaire nette (Qiao *et al.*, 2014), n'est pour le moment pas prise en compte. Les apports de carbone racinaires seront donc surestimés pour les masses racinaires mais sous-estimés par la non prise en compte de l'exsudation racinaire.

Retour p. 19

## ANNEXE 13 : RÉSUMÉ DES DONNÉES BRUTES UTILISÉES

Parcelle	Horizon 1	Horizon 2	Horizon 3
<b>Masse de terre fine (&lt; à 2 µm) (en kg)</b>			
(moyenne ± erreur standard)			
E (n=6)	406,8 ± 52,6	698,0 ± 64,6	1145,4 ± 107,4
F (n=6)	279,5 ± 35,7	534,3 ± 53,9	938,5 ± 151,6
G (n=6)	426,0 ± 43,6	753,7 ± 75,3	1168,0 ± 66,2
<b>Plantée</b> (n=18)	370,8 ± 28,8	662,0 ± 41,9	1084,0 ± 66,6
<b>Forêt</b> (n=4)	515,0 ± 43,9	918,3 ± 31,1	1604,1 ± 59,7
<b>Témoin</b> (n=5)	632,2 ± 35,4	1046,2 ± 49,1	1566,8 ± 65,8
<b>Proportion d'éléments grossiers (&gt; à 2 µm) (en %)</b>			
E (n=6)	38,5 ± 6,0	40,4 ± 8,2	29,3 ± 7,2
F (n=6)	58,8 ± 5,2	57,6 ± 7,0	44,4 ± 10,0
G (n=6)	29,3 ± 6,4	29,3 ± 8,0	23,4 ± 5,6
<b>Plantée</b> (n=18)	42,2 ± 4,4	42,4 ± 5,1	32,4 ± 4,7
<b>Forêt</b> (n=4)	11,9 ± 2,9	21,2 ± 4,9	11,6 ± 2,3
<b>Témoin</b> (n=5)	8,2 ± 1,3	7,3 ± 1,5	10,0 ± 2,1
<b>Masse d'éléments grossiers (entre 2 et 4 µm) (en kg)</b>			
E (n=6)	59,7 ± 17,7	130,8 ± 24,4	114,5 ± 34,9
F (n=6)	131,8 ± 26,2	173,0 ± 35,8	177,7 ± 46,0
G (n=6)	56,0 ± 13,7	81,5 ± 10,4	118,5 ± 19,3
<b>Plantée</b> (n=18)	82,5 ± 13,7	128,4 ± 16,6	136,9 ± 20,3
<b>Forêt</b> (n=4)	33,4 ± 5,4	66,2 ± 12,5	67,6 ± 7,4
<b>Témoin</b> (n=5)	22,6 ± 4,2	24,2 ± 4,1	77,4 ± 13,0
<b>Teneur en carbone de la terre fine (en gC.kg de sol<sup>-1</sup>)</b>			
E (n=6)	12,6 ± 3,8	4,5 ± 0,9	5,7 ± 1,4
F (n=6)	12,0 ± 1,5	6,1 ± 1,3	8,0 ± 2,2
G (n=6)	16,8 ± 0,9	11,5 ± 1,6	10,3 ± 1,7
<b>Plantée</b> (n=18)	13,8 ± 1,4	7,4 ± 1,0	8,0 ± 1,1
<b>Forêt</b> (n=4)	29,2 ± 1,1	15,5 ± 0,2	9,1 ± 0,4
<b>Témoin</b> (n=5)	6,1 ± 1,1	5,9 ± 0,9	6,4 ± 1,8

Parcelle	Horizon 1	Horizon 2	Horizon 3
<b>Teneur en azote de la terre fine (en gN.kg de sol<sup>-1</sup>)</b> (moyenne $\pm$ erreur standard)			
E (n=6)	1,07 $\pm$ 0,27	0,9 $\pm$ 0,07	0,57 $\pm$ 0,10
F (n=6)	1,02 $\pm$ 0,11	0,63 $\pm$ 0,11	0,72 $\pm$ 0,16
G (n=6)	1,45 $\pm$ 0,08	1,09 $\pm$ 0,15	0,99 $\pm$ 0,13
<b>Plantée</b> (n=18)	1,18 $\pm$ 0,11	0,74 $\pm$ 0,09	0,76 $\pm$ 0,08
<b>Forêt</b> (n=4)	2,30 $\pm$ 0,08	1,24 $\pm$ 0,01	0,81 $\pm$ 0,02
<b>Témoin</b> (n=5)	0,62 $\pm$ 0,07	0,59 $\pm$ 0,08	0,63 $\pm$ 0,12
<b>Teneur en carbone des éléments entre 2 et 4 <math>\mu</math>m (en gC.kg de sol<sup>-1</sup>)</b>			
E (n=6)	6,9 $\pm$ 1,1	3,8 $\pm$ 0,5	4,8 $\pm$ 1,2
F (n=6)	8,9 $\pm$ 2,0	4,5 $\pm$ 1,1	5,4 $\pm$ 1,3
G (n=6)	15,2 $\pm$ 1,8	8,9 $\pm$ 1,5	8,2 $\pm$ 1,3
<b>Plantée</b> (n=18)	10,4 $\pm$ 1,2	5,8 $\pm$ 0,8	6,2 $\pm$ 0,8
<b>Forêt</b> (n=4)	15,7 $\pm$ 1,4	10,7 $\pm$ 0,5	5,9 $\pm$ 0,20
<b>Témoin</b>	4,3 $\pm$ 1,9 (n=3)	3,7 $\pm$ 1,5 (n=3)	6,5 $\pm$ 2,1 (n=4)
<b>Teneur en azote des éléments entre 2 et 4 <math>\mu</math>m (en gN.kg de sol<sup>-1</sup>)</b>			
E (n=6)	0,63 $\pm$ 0,08	0,49 $\pm$ 0,03	0,53 $\pm$ 0,08
F (n=6)	0,75 $\pm$ 0,14	0,52 $\pm$ 0,09	0,55 $\pm$ 0,11
G (n=6)	1,08 $\pm$ 0,14	0,85 $\pm$ 0,12	0,75 $\pm$ 0,11
<b>Plantée</b> (n=18)	0,82 $\pm$ 0,08	0,62 $\pm$ 0,06	0,61 $\pm$ 0,06
<b>Forêt</b> (n=4)	1,06 $\pm$ 0,09	0,74 $\pm$ 0,03	0,52 $\pm$ 0,02
<b>Témoin</b>	0,38 $\pm$ 0,17 (n=3)	0,31 $\pm$ 0,13 (n=3)	0,54 $\pm$ 0,15 (n=4)
<b>Teneur en argile (en %)</b>			
E (n=6)	27,9 $\pm$ 6,2	22,9 $\pm$ 5,5	25,4 $\pm$ 5,3
F (n=6)	31,2 $\pm$ 8,5	27,9 $\pm$ 7,4	31,2 $\pm$ 8,6
G (n=6)	50,0 $\pm$ 4,8	48,7 $\pm$ 6,5	42,5 $\pm$ 7,0
<b>Plantée</b> (n=18)	36,4 $\pm$ 4,3	33,2 $\pm$ 4,5	33,0 $\pm$ 4,2
<b>Forêt</b> (n=4)	51,8 $\pm$ 1,4	60,0 $\pm$ 1,5	62,8 $\pm$ 0,6
<b>Témoin</b> (n=5)	31,8 $\pm$ 1,9	36,4 $\pm$ 2,4	34,2 $\pm$ 3,8

Parcelle	Horizon 1	Horizon 2	Horizon 3
<b>Teneur en limon (en %)</b>			
(moyenne $\pm$ erreur standard)			
E (n=6)	35,4 $\pm$ 5,7	33,2 $\pm$ 6,9	33,7 $\pm$ 5,6
F (n=6)	17,9 $\pm$ 1,9	20,1 $\pm$ 0,9	20,3 $\pm$ 1,3
G (n=6)	21,8 $\pm$ 0,9	22,5 $\pm$ 1,2	24,3 $\pm$ 1,4
<b>Plantée</b> (n=18)	25,0 $\pm$ 2,6	25,2 $\pm$ 2,6	26,1 $\pm$ 2,3
<b>Forêt</b> (n=4)	10,6 $\pm$ 0,7	10,6 $\pm$ 0,5	17,3 $\pm$ 1,1
<b>Témoin</b> (n=5)	25,1 $\pm$ 1,6	22,9 $\pm$ 2,4	23,6 $\pm$ 3,0
<b>Teneur en sable (en %)</b>			
E (n=6)	36,7 $\pm$ 7,8	43,9 $\pm$ 9,0	40,9 $\pm$ 8,3
F (n=6)	50,8 $\pm$ 9,2	52,0 $\pm$ 7,6	48,5 $\pm$ 9,3
G (n=6)	28,2 $\pm$ 4,6	28,8 $\pm$ 6,4	33,2 $\pm$ 6,9
<b>Plantée</b> (n=18)	38,6 $\pm$ 4,6	41,6 $\pm$ 4,8	40,8 $\pm$ 4,7
<b>Forêt</b> (n=4)	37,4 $\pm$ 1,6	29,4 $\pm$ 1,9	19,8 $\pm$ 1,2
<b>Témoin</b> (n=5)	43,2 $\pm$ 1,8	40,7 $\pm$ 0,7	42,2 $\pm$ 2,1
<b>Respiration potentielle (<math>\mu\text{g}</math> de C-CO<sub>2</sub>.g de sol<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>)</b>			
E (n=12)	1,41 $\pm$ 0,24	0,25 $\pm$ 0,03	0,32 $\pm$ 0,04
F (n=12)	2,17 $\pm$ 0,24	0,39 $\pm$ 0,06	0,29 $\pm$ 0,04
G (n=12)	1,29 $\pm$ 0,08	0,39 $\pm$ 0,03	0,31 $\pm$ 0,03
<b>Plantée</b> (n=36)	1,62 $\pm$ 0,13	0,34 $\pm$ 0,03	0,31 $\pm$ 0,02
<b>Forêt</b> (n=8)	1,63 $\pm$ 0,10	0,30 $\pm$ 0,01	0,21 $\pm$ 0,01
<b>Témoin</b> (n=10)	0,31 $\pm$ 0,03	0,16 $\pm$ 0,01	0,18 $\pm$ 0,01
<b>Respiration basale (<math>\mu\text{g}</math> de C-CO<sub>2</sub>.g de sol<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>)</b>			
E (n=12)	0,95 $\pm$ 0,25	0,14 $\pm$ 0,02	0,16 $\pm$ 0,01
F (n=12)	1,60 $\pm$ 0,17	0,25 $\pm$ 0,03	0,19 $\pm$ 0,03
G (n=12)	0,93 $\pm$ 0,07	0,22 $\pm$ 0,01	0,19 $\pm$ 0,02
<b>Plantée</b> (n=36)	1,16 $\pm$ 0,11	0,20 $\pm$ 0,01	0,18 $\pm$ 0,01
<b>Forêt</b> (n=8)	1,39 $\pm$ 0,07	0,23 $\pm$ 0,01	0,12 $\pm$ 0,01
<b>Témoin</b> (n=10)	0,21 $\pm$ 0,02	0,11 $\pm$ 0,01	0,14 $\pm$ 0,02

Parcelle	Horizon 1	Horizon 2	Horizon 3
<b>Dénitrification potentielle (<math>\mu\text{g de N-N}_2\text{O.g de sol}^{-1}.\text{h}^{-1}</math>) (moyenne <math>\pm</math> erreur standard)</b>			
E (n=12)	0,15 $\pm$ 0,04	0,0030 $\pm$ 0,0010	0,0043 $\pm$ 0,0022
F (n=12)	0,28 $\pm$ 0,05	0,024 $\pm$ 0,008	0,0098 $\pm$ 0,0037
G (n=12)	0,21 $\pm$ 0,02	0,012 $\pm$ 0,003	0,0017 $\pm$ 0,0005
<b>Plantée</b> (n=36)	0,21 $\pm$ 0,02	0,013 $\pm$ 0,003	0,0053 $\pm$ 0,0015
<b>Forêt</b> (n=8)	0,55 $\pm$ 0,02	0,018 $\pm$ 0,003	0,0007 $\pm$ 0,0003
<b>Témoin</b> (n=10)	0,0056 $\pm$ 0,0014	0,0013 $\pm$ 0,0003	0,0002 $\pm$ 0,0001
<b>C-CO<sub>2</sub> associé à la dénitrification potentielle (<math>\mu\text{g de C-CO}_2.\text{g de sol}^{-1}.\text{h}^{-1}</math>)</b>			
E (n=12)	1,01 $\pm$ 0,10	0,69 $\pm$ 0,11	0,73 $\pm$ 0,10
F (n=12)	0,87 $\pm$ 0,05	0,52 $\pm$ 0,08	0,45 $\pm$ 0,10
G (n=12)	1,04 $\pm$ 0,02	0,87 $\pm$ 0,03	0,83 $\pm$ 0,03
<b>Plantée</b> (n=36)	0,97 $\pm$ 0,04	0,69 $\pm$ 0,05	0,67 $\pm$ 0,05
<b>Forêt</b> (n=8)	0,89 $\pm$ 0,01	0,41 $\pm$ 0,01	1,05 $\pm$ 0,01
<b>Témoin</b> (n=10)	0,60 $\pm$ 0,05	0,62 $\pm$ 0,04	0,88 $\pm$ 0,09

Retour p. 20

Retour p. 24

## ANNEXE 14 : FONCTION R UTILISÉE POUR LA COMPARAISON DES MOYENNES DES ACTIVITÉS MICROBIENNES (MODÈLE LINÉAIRE MIXTE)

```
```{r}
f_gstat<-function(data,colname,ordolab){
  #avec colname le nom de la colonne variable à effet fixe du modèle
  #ordolab le titre donnée à l'axe des ordonnées
  ##création du modèle linéaire mixte
  lm=lmer(get(colname) ~ type + (1|nom_ech),data = data, REML = F)
  #nom_ech est le nom de la colonne variable à effet aléatoire
  ##création des comparaisons de moyennes par type
  ls=lsmmeans(lm,pairwise~type)
  ct=data.frame(contrast(ls,"pairwise"))
  print(lm);print(ls)
  ##récupération des p-values et association du code avec les étoiles pour
  # la norme utilisées pour les niveaux de significativité
  ct2=str_split(ct$lsmmeans.contrast," - ",simplify=TRUE)
  activ_max <- max(data[colname])
  p = round(ct$lsmmeans.p.value,3)
  p.adj.signif=c(0,0,0)
  for (i in 1:3){if (p[i]>=0.05) p.adj.signif[i]="ns" )
  for (i in 1:3){if (p[i]>=0.01 && p[i]<0.05) p.adj.signif[i]="*" )
  for (i in 1:3){if (p[i]>=0.001 && p[i]<0.01) p.adj.signif[i]="**" )
  for (i in 1:3){if (p[i]<0.001) p.adj.signif[i]="***" )
  test_data <- data.frame(group1 = ct2[,1], group2 = ct2[,2],
                          p.adj.signif,
                          y.position = (activ_max + activ_max* c(0.1,0.2,0.3)))
  ##Création du graphe pour présenter les résultats du test statistique
  graphe <- ggboxplot(data, x = "type", y = colname) + #création du boxplot
  theme(legend.position = "none")+
  #ajout des accolades pour les types significativement différents
  stat_pvalue_manual(test_data,hide.ns = TRUE,tip.length = 0.01,
                    bracket.nudge.y = 0, size=8)+
  #ajout des moyennes par type
  stat_summary(fun = mean, color="red", geom = "pointrange",shape=3, size = 1,
              position = position_dodge(width = .75))+
  #mise en forme des axes avec réorganisation de l'ordre des types
  scale_x_discrete(limits=c("témoin", "plantée", "forêt"))+
  theme(axis.title.x = element_text(size=14,face = "bold"),
        axis.title.y = element_text(size=14,face = "bold"),
        axis.text.x=element_text(size=14),
        panel.grid.major = element_line(size = 0.5, linetype = 'solid',
                                         colour = "gray90"))+
  xlab("Type de parcelle")+
  ylab(ordolab)
  plot(graphe)
}
```
```

Retour p. 20

## ANNEXE 15 : FONCTION R UTILISÉE POUR LA COMPARAISON DES STOCKS AJUSTÉS (MODÈLE LINÉAIRE À DEUX VARIABLES)

```

```{r}
f_ancova<-function(data,ex,quanti,titre=NULL,ordolab=NULL,correction="argile"){
  #ex la variable a expliquer, quanti la variable qualitative
  #titre le titre du graphe, ordolab le titre de l'axe des ordonnées
  dat = data.frame(data[,ex],data[,"type"],data[,quanti])
  colnames(dat) = c(ex,"type",quanti)
  f=as.formula(paste(names(dat)[1],"~",names(dat)[3],"+",names(dat)[2],collapse=""))
  #création du modèle linéaire à deux variables, les interactions entre les deux variables
  #ne sont pas étudiées car inexistantes dans notre cas
  l<- lm(f,dat)
  print(summary(l))
  #test de comparaison des moyennes et récupération des moyennes ajustées
  ls=lsmeans(l,pairwise~type)
  ##récupération des p-valeurs et association du code avec les étoiles pour
  # la norme utilisées pour les niveaux de significativité
  moy=data.frame(ls$lsmeans)
  ct=data.frame(contrast(ls,"pairwise"))
  print(ls)
  ct2=str_split(ct$lsmeans.contrast," - ",simplify=TRUE)
  arg=as.character(round(mean(dat[,3]),1))
  moy$type=factor(moy$type,levels=c("témoin","plantée","forêt"))
  activ_max <- max(moy$lsmean+moy$SE)
  p = round(ct$lsmeans.p.value,3)
  p.adj.signif=c(0,0,0)
  for (i in 1:3){if (p[i]>=0.05) p.adj.signif[i]="ns" )
  for (i in 1:3){if (p[i]>=0.01 && p[i]<0.05) p.adj.signif[i]="*" )
  for (i in 1:3){if (p[i]>=0.001 && p[i]<0.01) p.adj.signif[i]="**" )
  for (i in 1:3){if (p[i]<0.001) p.adj.signif[i]="***" )
  test_data <- data.frame(group1 = ct2[,1], group2 = ct2[,2],
    p.adj.signif,#Pour afficher les étoiles
    y.position = (activ_max + activ_max* c(0.05,0.15,0.25)))

  #création du graphe
  graphe = ggplot(moy,aes(x = type, y = lsmean))+ #création des moyennes
  #création des barres d'erreurs associées, ici l'erreur standard
  geom_errorbar(aes(ymin = lsmean - SE, ymax = lsmean + SE), position = position_dodge(0.1),
    width = 0.05) +
  geom_point(size=2) +
  theme_classic() +
  labs(title=titre,caption=paste("Ajustement au taux d'",correction,
    "moyen de l'horizon :",arg,"%",collapse=""))+
  #création des accolades pour les types significativement différents
  stat_pvalue_manual(test_data,hide.ns = TRUE,tip.length = 0.01,
    bracket.nudge.y = 0, size=6)+
  theme(axis.title.x = element_blank(),
    axis.title.y = element_text(size=12,face="bold"),
    axis.text.x=element_text(size=12,face="bold"),
    panel.grid.major = element_line(size = 0.5, linetype = 'solid',
    colour = "gray90"))+
  ylab(ordolab)
  return(graphe)
  return(moy)
}

```

Retour p. 20

ANNEXE 16 : SCRIPT R UTILISÉ POUR MODÉLISER L'ÉVOLUTION DES STOCKS DE CARBONE AVEC ROTHC

Partie de code ayant servi à simuler l'évolution des stocks de carbone sur 200 ans dans le sol de la parcelle plantée, depuis le début de la plantation.

```
```{r}
library(SoilR) #chargement du package intégrant les fonctions pour RothC
prof_etudiee=50 #profondeur étudiée en mètre
stock_c=27.2 #stock de carbone initial
argile=39.4 #teneur en argile dans le sol étudié
#Prédiction des effets de la température sur l'activité microbologique
fT=fT.RothC(Temp[,2]) #Temp contient la température par mois
#Prédiction de l'ETP et de la pluviométrie sur l'activité microbologique
fw=fw.RothC(P=(Precip[,2]), E=(Evp[,2]),
 s.Thick = prof_etudiee, pClay = argile,
 pE = 1.0, bare = FALSE)$b
#Precip et Evp contiennent les précipitations et l'etp par mois
annee=seq(1/12,200,by=1/12)
xi.frame2=data.frame(annee,rep(fT*fw,length.out=length(annee)))
InC=data.frame(annee)
#Création des apports de C par mois suivant une évolution de
#Michaelis-Menten
InC$mC=c(rep(0,2400))
for (i in 1:2400){
 InC$mC[i]=10.1*InC$annee[i]/(InC$annee[i]+5)
}
#initialisation des différents réservoirs
DPM=0;RPM=0;BIO=0.0695;HUM=18.163;IOM=4.31
#Création du modèle de RothC
Model=RothCModel(t=annee,CO=c(DPM, RPM, BIO, HUM, IOM),
 In=InC,clay=clay,xi=xi.frame2,DR=0.25)
Ct=getC(Model)# Récupération des résultats
Ct=data.frame(Ct)
colnames(Ct)=c("DPM","RPM","BIO","HUM","IOM")
Ct$stock_c=Ct$DPM+Ct$RPM+Ct$BIO+Ct$HUM+Ct$IOM
Ct$mois=seq(1,2400,by=1)
Ct$annee=2012+Ct4$mois/12
ini=data.frame(DPM,RPM,BIO,HUM,IOM,(DPM+RPM+BIO+HUM+IOM),0,2012)
colnames(ini)=c("DPM","RPM","BIO","HUM","IOM","stock_c","mois","annee")
Ct=rbind(ini,ct)

#Création d'un graphe avec - l'évolution du stock de C
- le stock de la forêt et son intervalle de confiance à 95%
- le stock avant plantation
ggplot(Ct, aes(x=annee)) +
 geom_line(aes(y = stock_c,color = "Stock C plantee")) +
 geom_line(aes(y = 50.9, color="Stock C forêt +/- SE"),lwd=1.2,linetype="longdash")+
 geom_line(aes(y = 22.6, color="Stock C avant plantation"),lwd=1.2,linetype="dotted")+
 #création de l'intervalle de confiance
 geom_ribbon(aes(ymin=46.2,ymax=55.6),alpha=0.2)+
 #couleurs choisies manuellement pour chaque courbe
 scale_color_manual(values = c("royalblue2","chartreuse4","firebrick3"))+
 #limite de l'axe des abscisses et des valeurs à afficher
 scale_x_continuous(limits=c(2012,2200),breaks=c(2020, 2050, 2100, 2150,2200))+
 ylab("Stock de carbone dans les premiers \n0,25 t/m² (en tc/ha)")+
 xlab("Années")+
 theme_minimal()+
 #mise en forme des textes à afficher
 theme(axis.title.x = element_text(size=12,face="bold"),
 axis.title.y = element_text(size=12,face="bold"),
 axis.text.x = element_text(size=12))
```

Retour p. 20

## ANNEXE 17 : DONNÉES UTILISÉES POUR LES DIFFÉRENTES FIGURES

Dans cette annexe, comme dans le reste du mémoire, les moyennes sont données suivies de plus ou moins l'erreur standard.

Tableau 7 : Données utilisées pour la Figure 9

MBC ( $\mu\text{g}$ de C-biomasse.g de sol <sup>-1</sup> )	Horizon 1	Témoin	Plantée	Groupes
Témoin (n=10)	23,9 $\pm$ 22,7			a
Plantée (n=36)	121,6 $\pm$ 12,0	0,0018		b
Forêt (n=8)	122,1 $\pm$ 25,4	0,0192	0,9998	b

p-value de la comparaison Témoin versus Forêt

Deux lettres différentes indiquent que les deux types ont une moyenne significativement différente

Tableau 8 : Données utilisées pour la Figure 10

Ratio DEA -SIR corrigé	Horizon 1	Témoin	Plantée	Groupes
Témoin (n=10)	0,00028 $\pm$ 0,00010			a
Plantée (n=36)	0,032 $\pm$ 0,004	0,0547		a
Forêt (n=8)	0,21 $\pm$ 0,01	<0,0001	<0,0001	b

Tableau 9 : Données utilisées pour la Figure 11

qCO <sub>2</sub> (mg de C-CO <sub>2</sub> .g de C-biomasse <sup>-1</sup> )	Horizon 1	Témoin	Plantée	Groupes
Témoin (n=10)	0,211 $\pm$ 0,007			ab
Plantée (n=36)	0,219 $\pm$ 0,007	0,9172		a
Forêt (n=8)	0,274 $\pm$ 0,005	0,0667	0,0499	b

Tableau 10 : Données utilisées pour la Figure 12

QM (%)	Horizon 1	Témoin	Plantée	Groupes
Témoin (n=10)	0,42 $\pm$ 0,04			a
Plantée (n=32)	0,89 $\pm$ 0,08	0,0605		a
Forêt (n=8)	0,42 $\pm$ 0,02	1,0000	0,0931	a

Tableau 11 : Données utilisées pour la Figure 13

<b>TMG (%.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Horizon 1</b>	<b>Témoin</b>	<b>Plantée</b>	<b>Groupes</b>
Témoin (n=10)	0,0036 ± 0,0003			a
Plantée (n=32)	0,0093 ± 0,0011	0,1443		a
Forêt (n=8)	0,0048 ± 0,0002	0,9517	0,3474	a

Tableau 12 : Données utilisées pour la Figure 14

	<b>Stock brut de carbone (tC.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Stock brut d'azote (tN.ha<sup>-1</sup>)</b>
Témoin (n=5)	61,9 ± 12,6 (n=5)	6,1 ± 0,9 (n=5)
Plantée (n=18)	65,0 ± 8,2 (n=18)	6,1 ± 0,7 (n=18)
Forêt (n=8)	137,0 ± 5,0 (n=8)	11,3 ± 0,4 (n=8)

Tableau 13 : Données utilisées pour la Figure 15

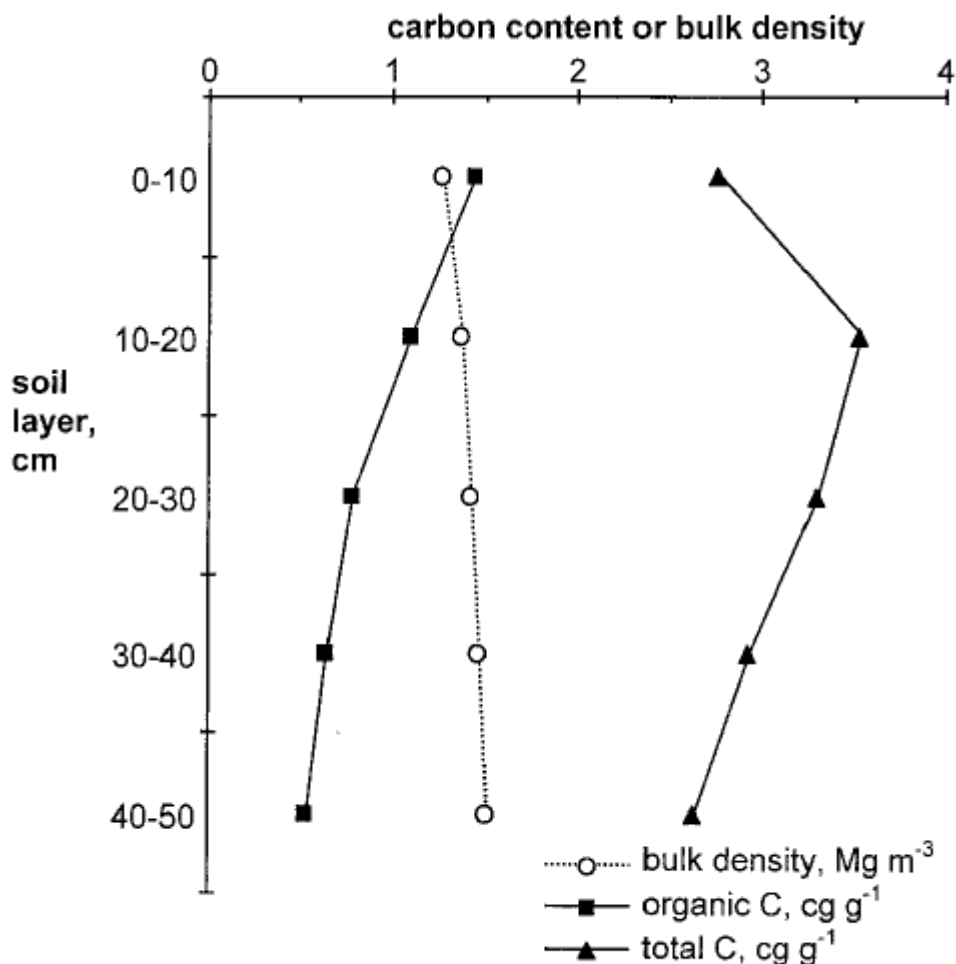
<b>Masse de terre fine de référence (en t.m<sup>-2</sup>)</b>	
Horizon 1 (n=6)	0,084 ± 0,011
Horizon 2 (n=6)	0,24 ± 0,06
Horizon 3 (n=6)	0,53 ± 0,06

Tableau 14 : Données utilisées pour Figures 16

	<b>Horizon 1</b>	<b>Horizon 2</b>	<b>Horizon 3</b>
<b>Teneur corrigée ajustée en C (en gC.kg de sol<sup>-1</sup>)</b>			
Témoin (n=5)	7,4 ± 1,7	7,4 ± 1,0	7,3 ± 0,8
Plantée (n=18)	13,7 ± 0,9	9,7 ± 0,5	9,5 ± 0,5
Forêt (n=8)	26,9 ± 1,5	17,5 ± 0,9	9,0 ± 0,8
<b>Teneur corrigée ajustée en N (en gN.kg de sol<sup>-1</sup>)</b>			
Témoin (n=5)	0,73 ± 0,12	0,72 ± 0,07	0,70 ± 0,05
Plantée (n=18)	1,2 ± 0,1	0,92 ± 0,04	0,90 ± 0,03
Forêt (n=8)	2,1 ± 0,1	1,4 ± 0,1	0,72 ± 0,05

Retour p. 21

## ANNEXE 18 : ÉVOLUTION TYPE DES CARACTÉRISTIQUES DES COUCHES SUCCESSIVES DE SOL



**Fig. 2. General characteristics of successive soil layers. Points represent means for six plots at the initial sampling time ( $n = 6$ ).**

Figure 33 : Évolution type des caractéristiques des couches successives de sol (d'après Ellert et al. (2002))

Retour p. 25

## ANNEXE 19 : TEXTURE NON CORRIGÉE ET CORRIGÉE PAR TYPE ET PAR HORIZON

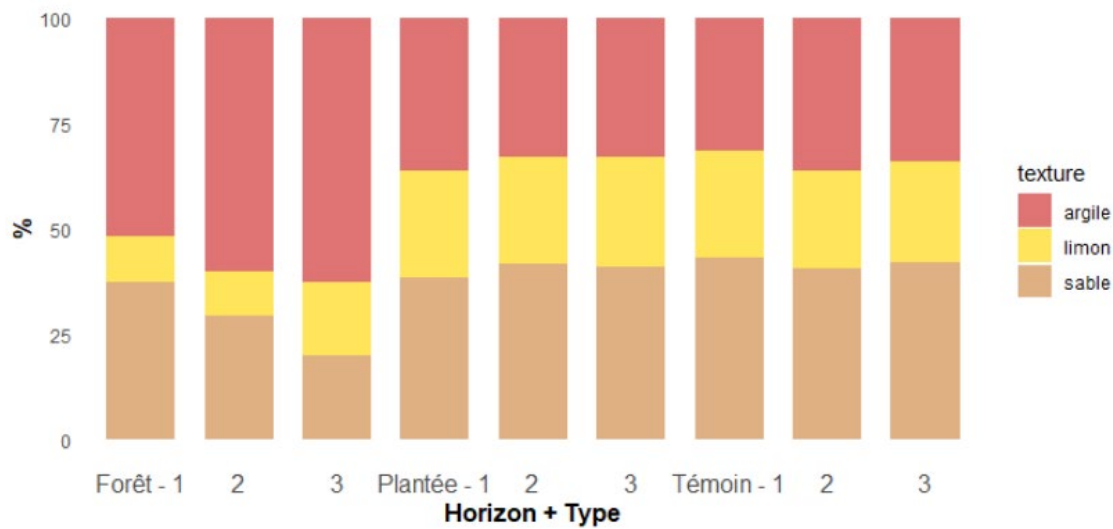


Figure 34 : Texture non corrigée par parcelle et par horizon

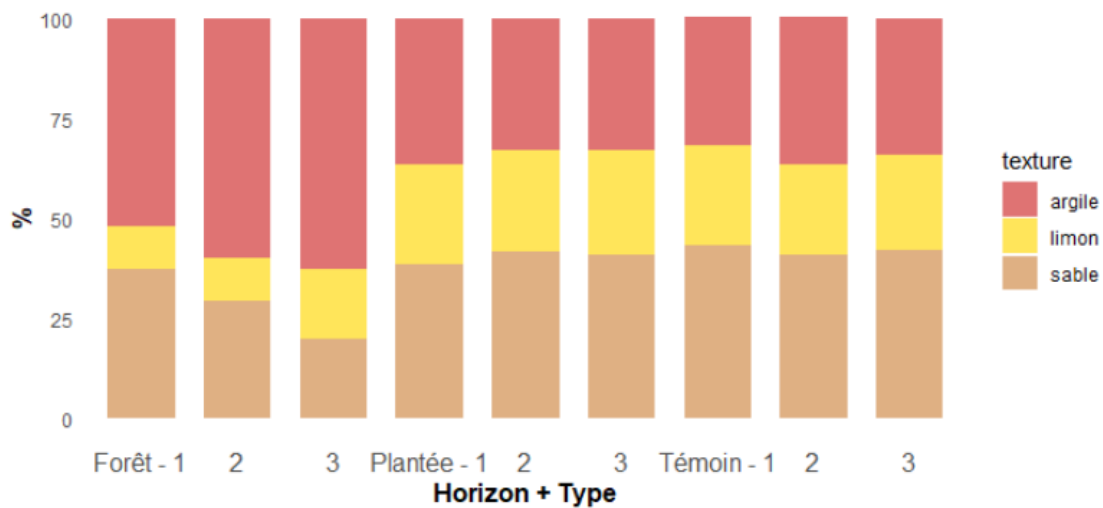


Figure 35 : Texture corrigée par parcelle et par horizon

Retour p. 26

Tableau 15 : Données utilisées pour la Figure 34 (moyenne  $\pm$  erreur standard)

Pourcentage de texture	Argiles	Limons	Sables
<b>Témoin (n=5)</b>			
Horizon 1	31,8 $\pm$ 1,9	25,1 $\pm$ 1,6	43,2 $\pm$ 1,8
Horizon 2	36,4 $\pm$ 2,4	22,9 $\pm$ 2,4	40,7 $\pm$ 0,7
Horizon 3	34,2 $\pm$ 3,8	23,6 $\pm$ 3,0	42,2 $\pm$ 2,1
<b>Plantée (n=18)</b>			
Horizon 1	36,4 $\pm$ 2,6	25,0 $\pm$ 2,6	38,6 $\pm$ 4,6
Horizon 2	33,2 $\pm$ 2,6	25,2 $\pm$ 2,6	41,6 $\pm$ 4,8
Horizon 3	33,0 $\pm$ 2,3	26,1 $\pm$ 2,3	40,8 $\pm$ 4,7
<b>Forêt (n=4)</b>			
Horizon 1	51,8 $\pm$ 0,7	10,6 $\pm$ 0,7	37,4 $\pm$ 1,6
Horizon 2	60,0 $\pm$ 0,5	10,6 $\pm$ 0,5	29,4 $\pm$ 1,9
Horizon 3	62,8 $\pm$ 1,1	17,3 $\pm$ 1,1	19,8 $\pm$ 1,2

Tableau 16 : Données utilisées pour la Figure 35 (moyenne  $\pm$  erreur standard)

Pourcentage de texture	Argiles	Limons	Sables
<b>Témoin (n=5)</b>			
Horizon 1	31,8 $\pm$ 1,9	25,1 $\pm$ 1,7	43,2 $\pm$ 1,8
Horizon 2	33,8 $\pm$ 1,7	24,2 $\pm$ 1,9	42,0 $\pm$ 1,3
Horizon 3	35,1 $\pm$ 2,3	23,6 $\pm$ 2,5	41,3 $\pm$ 0,7
<b>Plantée (n=18)</b>			
Horizon 1	35,2 $\pm$ 4,2	25,4 $\pm$ 2,6	39,4 $\pm$ 4,7
Horizon 2	33,8 $\pm$ 4,4	25,5 $\pm$ 2,4	40,7 $\pm$ 4,6
Horizon 3	34,1 $\pm$ 4,4	25,8 $\pm$ 2,5	40,1 $\pm$ 4,8
<b>Forêt (n=8)</b>			
Horizon 1	51,9 $\pm$ 1,4	10,7 $\pm$ 0,7	37,5 $\pm$ 1,6
Horizon 2	56,2 $\pm$ 1,5	10,8 $\pm$ 0,4	33,0 $\pm$ 1,8
Horizon 3	61,3 $\pm$ 0,9	12,7 $\pm$ 0,7	26,0 $\pm$ 1,5

Retour p. 26

## ANNEXE 20 : TABLEAU UTILISÉ POUR L'ÉTUDE DES AJUSTEMENTS POSSIBLES POUR LES STOCKS

Tableau 17 : Coefficient de détermination de la relation linéaire entre le stock de carbone corrigé et la teneur en argiles ou argiles plus limons

<b>Coef de détermination</b>	Témoin	Plantée	Forêt	H1	H2	H3	Total
Argiles	0,45	0,36	0,45	0,41	0,72	0,80	0,59
Argiles plus limons	0,07	0,33	0,30	0,06	0,28	0,50	0,28

Retour p. 26

## ANNEXE 21 : STOCKS DE CARBONE PAR HORIZON, CORRIGÉS ET AJUSTÉS

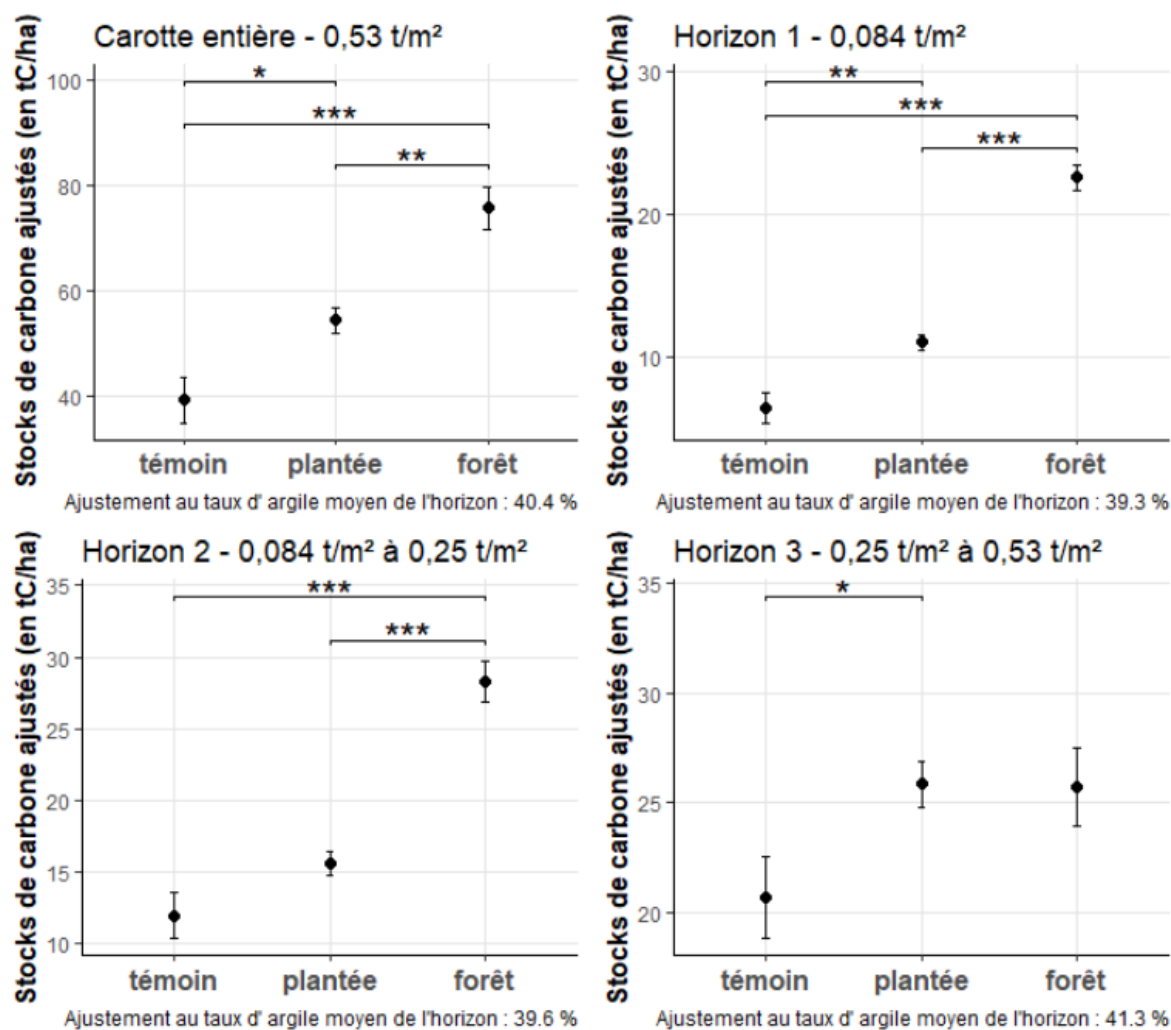


Figure 36 : Stocks de carbone par horizon, corrigés et ajustés

Tableau 18 : Données pour les Figure 17 et Figure 36 (moyenne  $\pm$  erreur standard)

Stocks d'azote (tC.ha <sup>-1</sup> )	Carotte entière	Horizon 1	Horizon 2	Horizon 3
Témoin (n=5)	39,3 $\pm$ 4,3	6,4 $\pm$ 1,0	12,0 $\pm$ 1,6	20,7 $\pm$ 1,9
Plantée (n=18)	54,4 $\pm$ 2,3	11,0 $\pm$ 0,6	15,6 $\pm$ 0,9	25,9 $\pm$ 1,1
Forêt (n=8)	75,7 $\pm$ 4,0	22,5 $\pm$ 0,9	28,3 $\pm$ 1,4	25,7 $\pm$ 1,8

Tableau 19 : Statistiques utilisées pour les Figure 17 et Figure 36 (p-values)

	Carotte entière	Horizon 1	Horizon 2	Horizon 3
Témoin - Plantée	0,0097	0,0014	0,1186	0,0481
Témoin - Forêt	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,1681
Plantée - Forêt	0,0007	<0,0001	<0,0001	0,9977
P-value du modèle	1,63. 10 <sup>-14</sup>	1,06.10 <sup>-14</sup>	7,40.10 <sup>-15</sup>	2,42. 10 <sup>-13</sup>

## ANNEXE 22 : COMPARAISON DES STOCKS DE CARBONE EN FONCTION DES CORRECTIONS EFFECTUÉES

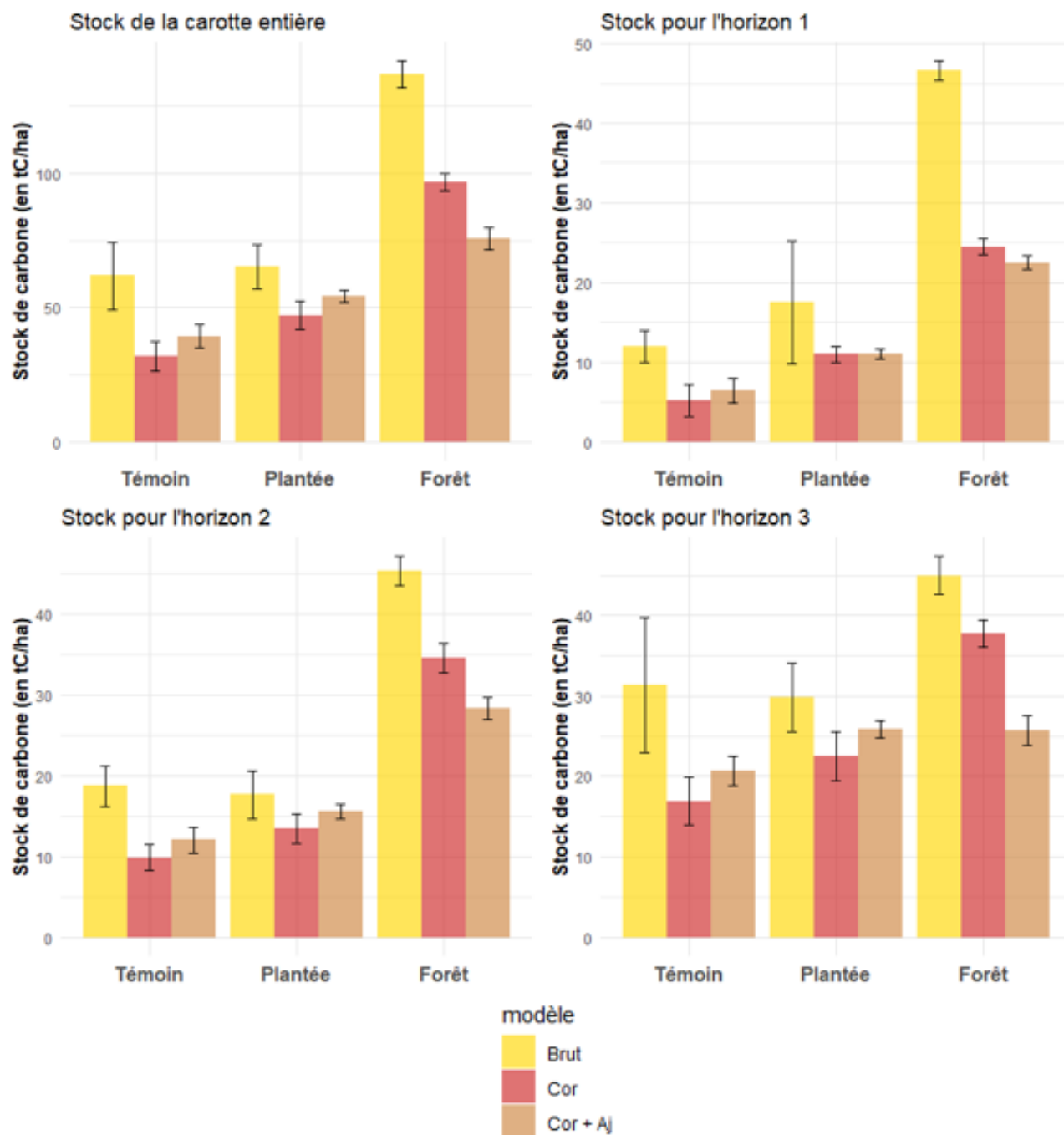


Figure 37 : Comparaison des stocks de carbone en fonction des modifications effectuées

avec

*Brut* : les stocks bruts sans modification,

*Cor* : les stocks après correction massique et

*Cor + Aj* : les stocks après correction massique et ajustement par la teneur en argile.

Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard.

Retour p. 26

Tableau 20 : Données utilisées pour la Figure 37 (moyenne  $\pm$  erreur standard)

<b>Stock de Carbone (tC.ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Brut</b>	<b>Corrigé</b>	<b>Corrigé, ajusté</b>
<b>Carotte entière</b>			
Témoin (n=5)	61,9 $\pm$ 12,6	31,9 $\pm$ 5,4	39,3 $\pm$ 4,3
Plantée (n=18)	65,0 $\pm$ 8,2	47,0 $\pm$ 5,3	54,4 $\pm$ 2,3
Forêt (n=8)	136,8 $\pm$ 5,0	96,8 $\pm$ 3,3	75,7 $\pm$ 4,0
<b>Horizon 1</b>			
Témoin (n=5)	11,9 $\pm$ 2,0	5,2 $\pm$ 2,0	6,4 $\pm$ 1,6
Plantée (n=18)	17,5 $\pm$ 7,7	11,0 $\pm$ 1,0	11,0 $\pm$ 0,6
Forêt (n=8)	46,6 $\pm$ 1,2	24,5 $\pm$ 1,0	22,5 $\pm$ 0,9
<b>Horizon 2</b>			
Témoin (n=5)	18,7 $\pm$ 2,5	9,8 $\pm$ 1,6	12,0 $\pm$ 1,6
Plantée (n=18)	17,6 $\pm$ 2,9	13,4 $\pm$ 1,8	15,6 $\pm$ 0,9
Forêt (n=8)	45,2 $\pm$ 1,8	34,5 $\pm$ 1,8	28,3 $\pm$ 1,4
<b>Horizon 3</b>			
Témoin (n=5)	31,3 $\pm$ 8,4	16,9 $\pm$ 3,0	20,7 $\pm$ 1,8
Plantée (n=18)	29,8 $\pm$ 4,3	22,5 $\pm$ 3,0	25,9 $\pm$ 1,1
Forêt (n=8)	45,0 $\pm$ 2,3	37,8 $\pm$ 1,7	25,7 $\pm$ 1,8

Retour p. 26

## ANNEXE 23 : STOCKS D'AZOTE PAR HORIZON, CORRIGÉS ET AJUSTÉS

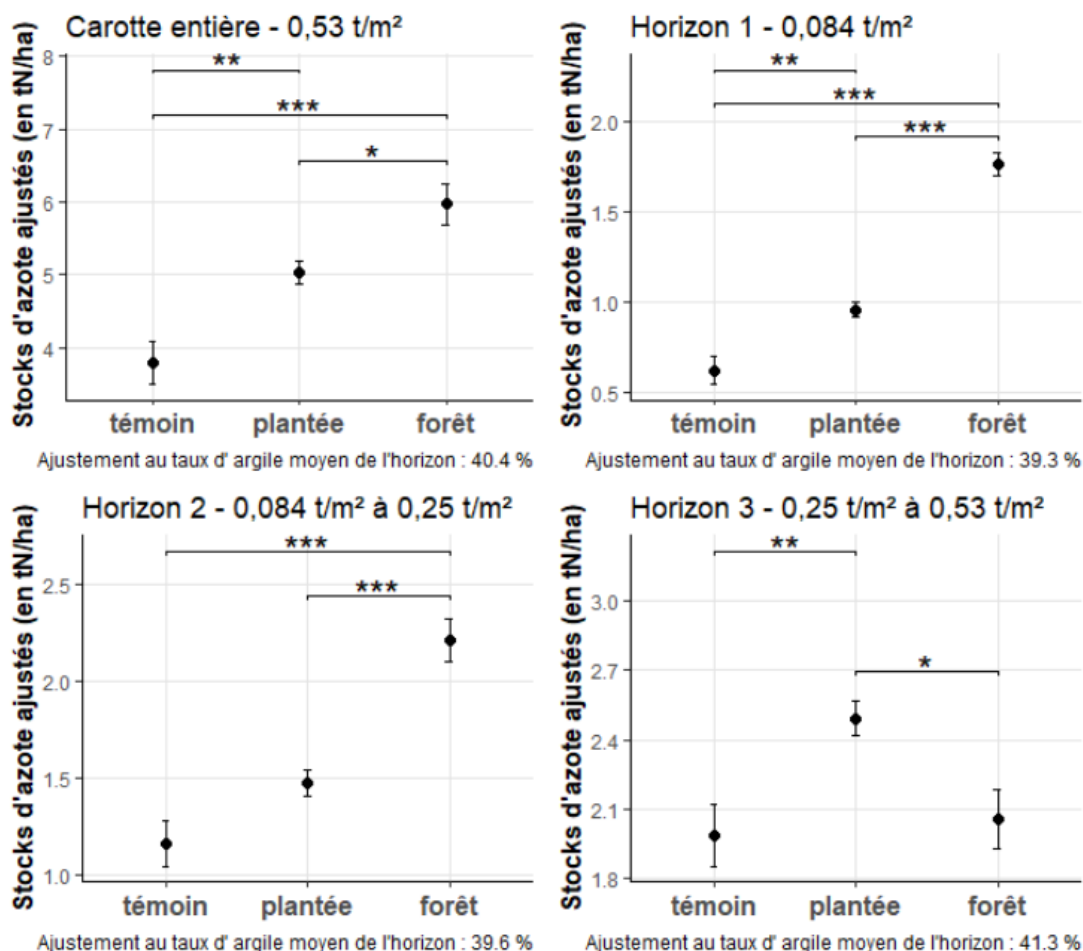


Figure 38 : Stocks d'azote par horizon, corrigés et ajustés

Tableau 21 : Données pour les Figure 18 et Figure 38 (moyenne  $\pm$  erreur standard)

Stocks d'N (tN.ha <sup>-1</sup> )	Carotte entière	Horizon 1	Horizon 2	Horizon 3
Témoin (n=5)	3,79 $\pm$ 0,29	0,62 $\pm$ 0,07	1,17 $\pm$ 0,12	1,99 $\pm$ 0,13
Plantée (n=18)	5,03 $\pm$ 0,16	0,96 $\pm$ 0,04	1,48 $\pm$ 0,06	2,49 $\pm$ 0,08
Forêt (n=8)	5,97 $\pm$ 0,28	1,76 $\pm$ 0,06	2,21 $\pm$ 0,11	2,06 $\pm$ 0,13

Tableau 22 : Statistiques utilisées pour les Figure 18 et Figure 38 (p-values)

	Carotte entière	Horizon 1	Horizon 2	Horizon 3
Témoin - Plantée	0,0021	0,0013	0,0651	0,0058
Témoin - Forêt	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,9331
Plantée - Forêt	0,0306	<0,0001	<0,0001	0,0314
P-value du modèle	2,78. 10 <sup>-15</sup>	7,06.10 <sup>-15</sup>	9,50.10 <sup>-15</sup>	4,44. 10 <sup>-14</sup>