

## Evaluation de la fertilité de différents types de buttes de style permacole

**Auteur :** Jacques, Florence

**Promoteur(s) :** 6601

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : sciences agronomiques, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2020-2021

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/12980>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

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

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

---

# **EVALUATION DE LA FERTILITE DE DIFFERENTS TYPES DE BUTTES DE STYLE PERMACOLE**

**FLORENCE JACQUES**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021**

**PROMOTRICE : CAROLINE DE CLERCK**

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

Le présent document n'engage que son auteur.

# **EVALUATION DE LA FERTILITE DE DIFFERENTS TYPES DE BUTTES DE STYLE PERMACOLE**

**FLORENCE JACQUES**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES AGRONOMIQUES**

**ANNEE ACADEMIQUE 2020-2021**

**PROMOTRICE : CAROLINE DE CLERCK**

## REMERCIEMENTS

---

J'aimerais dans un premier temps remercier ma promotrice, Caroline De Clerck, pour sa disponibilité, son encadrement de qualité et ses conseils judicieux qui ont contribué à la bonne mise en œuvre de ce travail.

Merci aux collègues de l'unité de phytotechnie tempérée pour leur accueil chaleureux. Je remercie également Christophe Lacroix et Laura Fagnant pour leurs précieux conseils, notamment en matière d'analyse statistique.

Je remercie également Damien Médart, maraîcher en charge de la parcelle dédiée au jardinage et à l'horticulture de la plateforme WASABI, et son collègue Léo Fauconnier, pour le temps et l'énergie qu'ils ont consacrés aux buttes.

Je souhaite remercier l'équipe du département Échanges Eau – Sol – Plantes de GxABT, l'équipe du département Gestion durable des bio-agresseurs, et l'équipe du département Plant Sciences pour m'avoir permis de réaliser mes analyses. Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance à Raphaël Tarantino, Pauline Biron, Aurore Houtart et Cyril Voss pour leur aide précieuse en laboratoire.

Je voudrais remercier Aurore Degré et Yves Brostaux pour leurs conseils judicieux et pour avoir répondu à mes questions. Également un tout grand merci à Stéphane Becquevort pour sa disponibilité, son aide sur le terrain et pour avoir réalisé les mesures de rétention d'eau en laboratoire.

Je remercie aussi mon parrain et mon papa pour avoir relu et corrigé mon travail.

Merci à ma famille et à mes très chers parents pour m'avoir donné la chance de suivre ces études et encouragé tout au long de mon parcours. Je remercie ma sœur Hélène qui a toujours été là pour moi.

Un grand merci aux copains de la faculté pour les échanges qu'on a pu avoir et les merveilleux moments passés ensemble durant ces 5 années. Je remercie Charlotte pour son aide sur le terrain et son soutien inconditionnel et pour m'avoir fait découvrir ce sujet de TFE.

Pour finir, je souhaite remercier Gilles, qui chaque jour m'a aidé à avancer dans mon travail, et qui a toujours été là pour moi.

## RÉSUMÉ

---

La gestion durable de la fertilité des sols a un rôle à jouer dans l'atténuation du réchauffement climatique et est un défi majeur pour le maintien d'une production agricole durable. La transition vers de nouvelles pratiques de gestion durable des terres qui maintiennent la fertilité des sols est nécessaire. Dans ce contexte, la culture sur butte permacole, technique agricole qui se base sur l'activité biologique du sol et l'apport massif de matière organique pour maintenir sa fertilité, suscite un intérêt croissant.

Ce travail a pour objectif de contribuer à l'évaluation de la fertilité de quatre types de buttes permanentes de style permacole en plus d'un témoin non butté.

La fertilité du sol a été évaluée par l'analyse des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol de chaque type de butte et du témoin. En plus de cela, la croissance des cultures mises en place a été suivie tout au long de la saison de culture et leur biomasse a été mesurée.

Le carbone organique total et l'azote total semblent plus élevés dans les buttes forestières, en lasagne et sandwich grâce à l'apport de matière organique. La densité apparente semble plus faible et la porosité totale plus élevée dans les buttes en lasagne, forestières et sandwich, sans doute pour la même raison. Les témoins et les buttes en terre semblent contenir plus d'eau disponible pour les plantes que les buttes contenant de la matière organique. La butte favorise le réchauffement du sol à 12 cm de profondeur grâce à sa forme arrondie. La culture sur buttes composées de matière organique augmente significativement la biomasse microbienne. L'activité microbienne est plus élevée dans les buttes sandwich, en terre et en lasagne. La production de biomasse végétale est considérablement supérieure sur les buttes forestières par rapport aux témoins non buttés, certainement grâce à une meilleure fertilité chimique (carbone organique total et azote total plus élevés) et physique (densité apparente plus faible et porosité totale plus élevée) dues à l'apport de matière organique. Les buttes sandwich sont les moins productives sans doute à cause d'une faim d'azote.

Au terme de cette première année d'expérimentation, les résultats montrent clairement que la culture sur butte de style permacole a une influence sur le rendement et les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol par rapport à la culture sur sol non butté. Les effets bénéfiques des buttes permacoles étant généralement observés après plusieurs années, l'étude de la fertilité des buttes de style permacole devra nécessairement s'étendre sur plusieurs années.

## MOTS CLÉS

---

Transition agricole, butte permanente, fertilité du sol, matière organique, agriculture durable

## ABSTRACT

---

Sustainable soil fertility management has a role to play in mitigating global warming and is a major challenge for maintaining sustainable agricultural production. The transition to new sustainable land management practices that maintain soil fertility is necessary. In this context, there is growing interest in permaculture mound farming, a farming technique that relies on soil biological activity and massive organic matter input to maintain soil fertility.

The objective of this work is to contribute to the evaluation of the fertility of four types of permaculture style mounds in addition to a non-mounded control.

Soil fertility was assessed by analysing the physical, chemical and biological soil properties of each mound type and the control. In addition, the growth of the planted crops was monitored throughout the growing season and their biomass was measured.

Total organic carbon and total nitrogen appeared to be higher in the hugel, lasagne and sandwich mounds due to the addition of organic matter. Bulk density appeared to be lower and total porosity higher in the lasagne, hugel and sandwich mounds, probably for the same reason. Controls and soil mounds appear to have more plant available water than mounds with organic matter. The mound favours soil warming at a depth of 12 cm due to its rounded shape. Cultivation on mounds composed of organic matter significantly increases microbial biomass. Microbial activity is higher in sandwich, soil and lasagne mounds. Plant biomass production is significantly higher on the hugel mounds than on the unmounded controls, probably due to better chemical (higher total organic carbon and total nitrogen) and physical (lower bulk density and higher total porosity) fertility due to the organic matter input. The sandwich mounds were the least productive, probably due to nitrogen deficiency.

At the end of this first year of experimentation, the results clearly show that permaculture style mound cultivation has an influence on the yield and the physical, chemical and biological properties of the soil compared to cultivation on non-mounded soil. As the beneficial effects of permaculture mounds are generally observed after several years, the study of the fertility of permaculture style mounds over several years is necessary.

## KEY WORDS

---

Agricultural transition, permanent mound, soil fertility, organic matter, sustainable agriculture

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

---

Al : aluminium

C/N : carbone organique total / azote total

Ca : calcium

CEC : capacité d'échange cationique

CMA : champignon mycorhizien à arbuscules

CO : carbone organique

FDA : diacétate de fluorescéine

K : potassium

Mg : magnésium

MO : matière organique

N : azote

Na : sodium

P : phosphore

PAW : eau disponible pour les plantes

SB : taux de saturation en bases du complexe d'échange

T : porosité totale

$\delta$  : densité apparente sèche



# TABLE DES MATIÈRES

---

1	Introduction.....	1
2	Revue de la littérature scientifique .....	2
2.1	La fertilité des sols.....	2
2.1.1	Définition du concept de fertilité et de ses principales composantes.....	2
2.1.2	La MO et ses effets sur la fertilité des sols.....	2
2.1.2.1	Définition et dynamique de la MO.....	2
2.1.2.2	Effets de la MO sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols.....	3
2.1.3	Les enjeux actuels et futurs de la fertilité des sols.....	4
2.2	Les buttes de type permacole : une réponse adaptée au défi d'une gestion durable de la fertilité ? .....	4
2.3	Les indicateurs de fertilité des sols .....	5
2.3.1	Indicateurs chimiques .....	6
2.3.2	Indicateurs physiques.....	7
2.3.3	Indicateurs biologiques .....	8
3	Objectifs du travail de fin d'études .....	10
4	Matériel et méthodes.....	11
4.1	Localisation de l'essai .....	11
4.2	Conditions climatiques .....	11
4.3	Facteurs étudiés .....	11
4.4	Dispositif expérimental .....	12
4.5	Mise en place des cultures .....	13
4.6	Suivi de la culture de pois.....	15
4.6.1	Observation des levées et des stades de développement des pois mangetout.....	15
4.6.2	Nodosités et mycorhizes dans les racines de pois .....	16
4.6.2.1	Echantillonnage .....	16
4.6.2.2	Comptage des nodosités .....	16
4.6.2.3	Coloration des mycorhizes .....	16
4.6.2.4	Abondance des CMA dans les racines de pois .....	16
4.7	Récoltes et quantification de la biomasse aérienne .....	17
4.7.1	Épinards.....	17
4.7.2	Laitues .....	18
4.7.3	Pois mangetout.....	18
4.7.4	Oignons tiges .....	18

4.7.5	Fenouils .....	18
4.8	Analyses du « (techno)sol ».....	18
4.8.1	Caractéristiques chimiques du sol.....	18
4.8.1.1	Échantillonnage .....	18
4.8.1.2	Détermination de la CEC, des bases échangeables et du taux de saturation .....	19
4.8.2	Caractéristiques physiques du sol .....	20
4.8.2.1	Teneur en eau du sol .....	20
4.8.2.2	Eau disponible pour les plantes, densité apparente sèche et porosité totale.....	20
4.8.2.3	Température du sol .....	23
4.8.3	Caractéristiques biologiques du sol.....	23
4.8.3.1	Comparaison de l'activité microbienne dans le sol des buttes.....	23
4.8.3.2	Détermination de la biomasse microbienne du sol .....	24
4.9	Analyses statistiques .....	25
5	Résultats .....	27
5.1	Observations personnelles .....	27
5.2	Suivi de la culture de pois.....	28
5.2.1	Levées et stades de développement des pois mangetout de Grace® .....	28
5.2.2	Nodosités et mycorhizes dans les racines de pois .....	28
5.3	Quantification de la biomasse aérienne.....	29
5.3.1	Épinards.....	29
5.3.1.1	Hauteur des plants .....	29
5.3.1.2	Biomasse sèche .....	31
5.3.2	Laitues .....	32
5.3.3	Pois mangetout.....	34
5.3.4	Oignons tiges .....	34
5.3.4.1	Hauteur des plants .....	34
5.3.4.2	Biomasse fraîche .....	36
5.3.5	Fenouils .....	37
5.4	Analyses du (techno)sol.....	39
5.4.1	Caractéristiques chimiques du sol.....	39
5.4.2	Caractéristiques physiques du sol .....	42
5.4.2.1	Eau disponible pour les plantes.....	42
5.4.2.2	Densité apparente sèche.....	42
5.4.2.3	Porosité totale .....	43
5.4.2.4	Teneur en eau du sol .....	43
5.4.2.5	Température du sol .....	44

5.4.3	Caractéristiques biologiques du sol.....	45
5.4.3.1	Activité microbienne .....	45
5.4.3.2	Biomasse microbienne .....	46
6	Discussion .....	48
7	Conclusions et perspectives .....	51
	Contribution personnelle .....	53
	Bibliographie.....	54
	Annexes .....	58

## TABLE DES FIGURES

Figure 1: Dynamique de la MO et ses contrôles écologiques proposée par Lehmann et al. (2015). ....	3
Figure 2 : Parcelle maraîchère WASABI.....	11
Figure 3 : Illustration de la composition des différents types de buttes et du témoin (coupe transversale).....	12
Figure 4 : Schéma du dispositif en blocs aléatoires complets.....	13
Figure 5 : Plan de culture d'une butte vue de haut.....	14
Figure 6 : Illustration des stades phénologiques des pois selon l'échelle BBCH (Meier, 2001).....	15
Figure 7 : Nettoyage des racines de pois au tuyau d'arrosage.....	16
Figure 8 : Classes pour l'estimation du niveau de colonisation mycorhizienne et de l'abondance des arbuscules pour chaque fragment de racine. ....	17
Figure 9 : Illustration des endroits de prélèvements de terre pour l'analyse chimique sur une butte.	19
Figure 10 : Illustration du prélèvement en structure conservée sur le témoin L1.....	21
Figure 11 : Endroits de prélèvements de sol pour l'analyse de l'activité enzymatique dans le sol des buttes .....	23
Figure 12 : Endroits de prélèvements de terre pour l'analyse du carbone microbien. ....	24
Figure 13 : Épinards sur une butte sandwich. ....	27
Figure 14 : Nombre moyen de nodosités sur les racines de pois selon le type de butte. ....	28
Figure 15 : Arbuscules de CMA dans les cellules des racines de pois observées au microscope. ....	29
Figure 16 : Hauteur des plants d'épinard (en cm) selon le type de butte.....	30
Figure 17 : Comparaison visuelle de la taille des épinards à la récolte selon le type de butte. ....	31
Figure 18 : Biomasse sèche des épinards (en g) en fonction du type de butte. ....	32
Figure 19 : Biomasse sèche (en g) des laitues en fonction du type de butte.....	33
Figure 20 : Observation visuelle des laitues avant la récolte. ....	34
Figure 21 : Taille des oignons à la récolte par type de butte. ....	35
Figure 22 : Comparaison visuelle de la taille des oignons tiges à la récolte selon le type de butte. ....	36
Figure 23 : Biomasse fraîche des oignons tiges par bottes de 5 (en g) en fonction du type de butte..	37
Figure 24 : Biomasse fraîche des fenouils (en g) en fonction du type de butte.....	38
Figure 25 : Comparaison visuelle des fenouils selon le type de butte. ....	39
Figure 26 : Densité apparente du sol (en g/cm <sup>3</sup> ) en fonction de la profondeur de sol pour 5 buttes de types différents. ....	42
Figure 27 : Porosité du sol (en %) en fonction de la profondeur de sol pour 5 buttes de type différent. ....	43
Figure 28 : Teneur en eau moyenne (en m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) pour chaque type de butte sur les mois de mai et juin.....	43
Figure 29 : Température du sol des buttes le 24 février 2021. ....	44
Figure 30 : Température du sol des buttes le 13 mai 2021.....	45
Figure 31 : Absorbance à 490 nm selon le type de butte.....	46
Figure 32 : Carbone microbien (en µg/g de sol sec) selon le type de butte. ....	47

## TABLE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Calendrier des semis et repiquages des légumes cultivés sur les buttes .....	14
Tableau 2 : Calendrier des récoltes .....	17
Tableau 3 : Stades phénologiques moyens des pois selon l'échelle BBCH pour les différents types de buttes les 23 avril et 6 mai 2021. ....	28
Tableau 4 : Concentrations en COT, N total et rapport C/N des buttes n°1 et n°2.....	41
Tableau 5 : pH <sub>KCl</sub> et teneurs en éléments biodisponibles des buttes n°1 et n°2.....	41
Tableau 6 : CEC, bases échangeables et taux de saturation en bases du complexe d'échange (SB) ....	41
Tableau 7 : Eau disponible pour les plantes exprimée en cm sur une profondeur de 35 cm pour 5 buttes de type différent. ....	42

## TABLE DES ANNEXES

---

Annexe 1 : Droite d'étalonnage du Mg échangeable (dilution X 50). .....	58
Annexe 2 : Droite d'étalonnage du K échangeable (lecture directe). .....	58
Annexe 3 : Droite d'étalonnage du Na échangeable (lecture directe).....	59
Annexe 4 : Droite d'étalonnage du Na échangeable (dilution X 2,5). .....	59
Annexe 5 : Droite d'étalonnage du Ca échangeable (dilution X 100). .....	60
Annexe 6 : Droite d'étalonnage du Ca échangeable (dilution X 25). .....	60
Annexe 7 : Droite d'étalonnage du Ca échangeable (dilution X 75). .....	61
Annexe 8 : Évolution de la teneur en eau dans les 10 premiers cm du sol des buttes n°2 du 30 avril au 28 juin 2021.....	62
Annexe 9 : Protocole pour l'étalonnage en laboratoire de capteurs d'humidité : cas du Decagon ECH2O 10 HS (Beekkerk van Ruth et al., 2011). .....	63
Annexe 10 : Procédure des mesures de rétention d'eau (Appareil de Richards). .....	66
Annexe 11 : Température du sol des buttes le 5 mars 2021.....	75

# 1 INTRODUCTION

---

Les sols agricoles fournissent des végétaux pour l'alimentation humaine et animale ainsi que des fibres, des matériaux et des combustibles, ils constituent donc une ressource vitale pour l'Homme (Chenu et al., 2018). L'agriculture modifie le sol (Chenu et al., 2018). Certaines pratiques agricoles modernes comme l'apport de matière organique (MO) au sol, agissent positivement sur la fertilité du sol, tandis que d'autres, comme le travail du sol intensif, peuvent dégrader les sols (Chenu et al., 2018; Thibault et al., 2018).

En maraîchage, le sol est généralement soumis à un travail du sol intensif à cause de la succession rapide des cultures (Thibault et al., 2018; Le Cam, 2019). Des passages d'outils répétés ont le plus souvent été justifiés par les bénéfices qu'ils apportent en terme de quantité ou de qualité des productions végétales (Thibault et al., 2018). Cependant, ces interventions perturbent les (micro-) organismes bénéfiques ayant une importance capitale dans la fertilité des sols (Sharma et al., 2010; Hubert et al., 2011; Chenu et al., 2018; Thibault et al., 2018). En effet, Capowiez et al. (2009) ont montré que le labour réduit le nombre de vers de terre anéciques impliqués dans la décomposition de la litière végétale et la création de macropores dans le sol favorables à une bonne aération et une bonne infiltration de l'eau (Chan, 2001). Willekens et al. (2014) ont démontré que la réduction du travail du sol augmente la biomasse microbienne et fongique et favorise les actinomycètes et les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) à la surface du sol. Le travail du sol intensif, encore pratiqué à l'heure actuelle en maraîchage, entraîne donc une dégradation de la composante biologique du sol, pourtant garante de sa fertilité (Le Cam, 2019).

Un sol non fertile ne peut pas maintenir une production durable (Diacono et al., 2010). La gestion durable de la fertilité des sols est donc un défi majeur pour le maintien d'une production agricole durable (Le Cam, 2019). Dans ce travail, la gestion durable des sols est définie comme la gestion et l'utilisation des sols pour répondre aux besoins humains tout en assurant le potentiel productif à long terme de la terre et le maintien de ses fonctions environnementales (IPCC, 2019). La transition vers des pratiques agricoles qui permettent d'atteindre un niveau de production satisfaisant, sans dégrader les sols et qui maintiennent un niveau suffisant de fertilité est nécessaire (Chenu et al., 2018).

Les apports en MO au sol, très souvent réalisés en maraîchage, font partie des pratiques agricoles bénéfiques pour la fertilité des sols (Thibault et al., 2018; Le Cam, 2019). Les pistes à suivre pour préserver les apports en MO dans les sols agricoles sont donc à prioriser.

La culture de légumes sur butte permanente est une technique agricole ancienne qui se base sur l'activité biologique du sol et l'apport massif de MO pour assurer une production végétale durable. Il semblerait que cette technique agricole améliore les conditions environnementales pour les plantes cultivées ainsi que la fertilité du sol sur le long terme (Wallner, 2019). La culture sur butte pourrait être une réponse adaptée au défi d'une gestion durable de la fertilité des sols agricoles. Cependant, à l'heure actuelle, il existe peu d'articles scientifiques qui déterminent les effets de la culture sur butte sur la fertilité du sol à long terme. Ce travail vise donc à contribuer à l'étude de la fertilité sur le long terme de plusieurs buttes de culture de composition en MO différentes.

## 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE SCIENTIFIQUE

---

### 2.1 LA FERTILITÉ DES SOLS

#### 2.1.1 Définition du concept de fertilité et de ses principales composantes

Selon Abbott et Murphy (2007), la fertilité du sol est son aptitude à combler les besoins physiques, chimiques et biologiques nécessaires à la croissance des plantes. Les composantes physiques, chimiques et biologiques du sol interagissent entre elles et influencent la disponibilité en éléments nutritifs pour les plantes et les conditions de croissance et de fonctionnement des racines (Chenu et al., 2018; Le Cam, 2019). Par exemple, un sol qui présente de bonnes conditions physico-chimiques, c'est-à-dire un pH plutôt neutre, une bonne aération, une bonne humidité,... va favoriser une bonne activité biologique (Le Cam, 2019) qui va décomposer la MO et rendre disponibles les éléments nutritifs dont la plante a besoin.

#### 2.1.2 La MO et ses effets sur la fertilité des sols

##### 2.1.2.1 Définition et dynamique de la MO

La MO est spécifique aux êtres vivants (Mustin, 1987). Les êtres vivants sont constitués de MO et de matière minérale telle que l'eau (Mustin, 1987). La MO est riche en carbone (Mustin, 1987). Il s'agit par exemple de résidus végétaux et animaux, de produits métaboliques des plantes, d'animaux ou de microorganismes, d'hydrates de carbone, de lignines, de protéines, de lipides, ... (Mustin, 1987; Lehmann et al., 2015). Selon Lehman et al (2015), la MO du sol est un continuum de substances organiques qui sont progressivement dégradées en molécules plus petites par les décomposeurs. Les décomposeurs sont des organismes hétérotrophes qui se nourrissent de MO pour obtenir l'énergie et les molécules dont ils ont besoin (Zakem et al., 2021). La Figure 1 montre la dynamique de la MO et ses contrôles écologiques proposée par Lehmann et al. (2015). Un continuum de composés organiques est continuellement décomposé (par dépolymérisation oxydative) par des organismes hétérotrophes (Lehmann et al., 2015; de Tombeur et al., 2018). Les décomposeurs minéralisent une grande partie de la MO en nutriments solubles dans l'eau et assimilables par les plantes (Lehmann et al., 2015; Zakem et al., 2021). Plus la MO est oxydée/dégradée, plus elle interagit avec la surface des composés minéraux du sol et plus elle est impliquée dans la formation des agrégats du sol (Lehmann et al., 2015). L'adsorption de la MO sur les surfaces minérales et son incorporation dans les agrégats du sol la protègent momentanément d'une décomposition ultérieure (Lehmann et al., 2015). Les macro-agrégats ont une taille supérieure à 250  $\mu\text{m}$  et celle des micro-agrégats est comprise entre 50  $\mu\text{m}$  et 250  $\mu\text{m}$  (Wiesmeier et al., 2019). Les macro-agrégats protègent moins bien la MO de la dégradation que les micro-agrégats qui sont impliqués dans la stabilisation de la MO à long terme (Wiesmeier et al., 2019). Les composés organiques adsorbés sur les minéraux peuvent être désorbés, échangés avec d'autres composés organiques puis dégradés (Lehmann et al., 2015). Le temps de renouvellement des MO varie selon plusieurs facteurs tels que l'abondance d'organismes décomposeurs et l'énergie dont ils ont besoin, ou encore les propriétés et l'abondance des surfaces minérales qui peuvent protéger la MO, etc (Lehmann et al., 2015). La MO qui n'est pas protégée est exposée à l'oxydation. La forme la plus oxydée du carbone contenu dans la MO du sol est le  $\text{CO}_2$  (Trigalet et al., 2017).



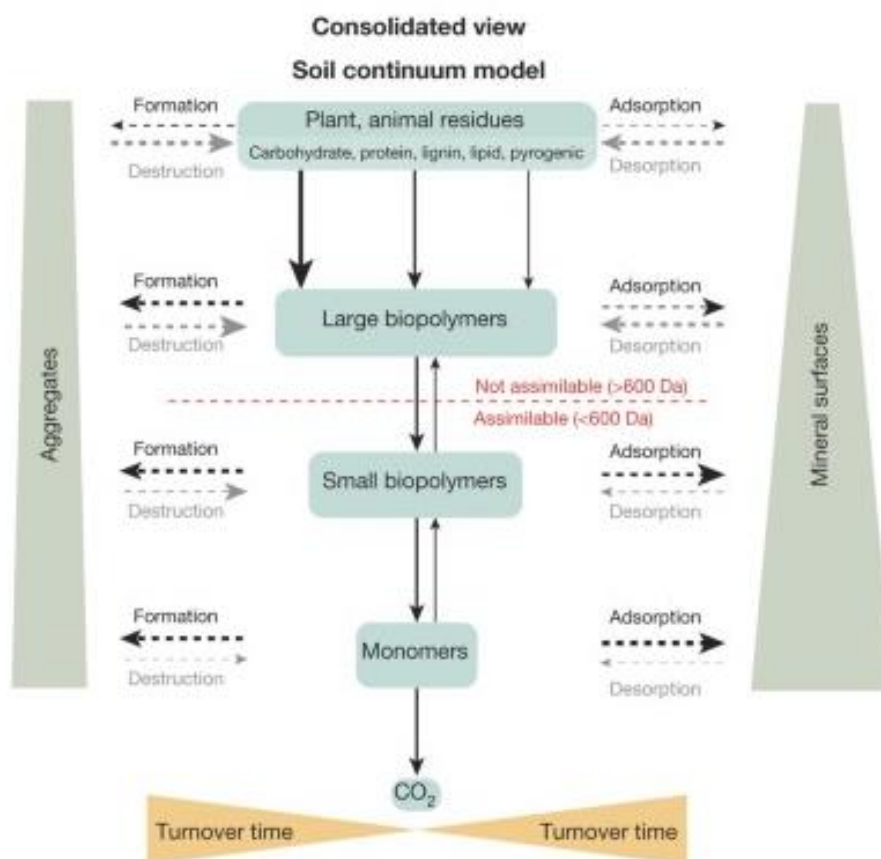


Figure 1: Dynamique de la MO et ses contrôles écologiques proposée par Lehmann et al. (2015). Les lignes fléchées en pointillés illustrent un transfert principalement abiotique, les lignes pleines un transfert principalement biotique ; les lignes plus épaisses signifient des taux plus rapides ; les quadrilatères plus grands illustrent des pools plus grands (Lehmann et al., 2015).

La MO du sol est donc un mélange hétérogène de composés carbonés d'origines diverses (végétales, animales, microbiennes), dont la stabilité et le taux de renouvellement diffèrent (Trigalet et al., 2017), et qui sont impliqués dans les différentes composantes de la fertilité des sols, tant physique (stabilité structurale à court et long terme), chimique (nutrition des plantes) que biologique (stimulation de l'activité biologique) (Salducci, 2007).

Le processus de décomposition de la MO subit l'influence de la température, de l'humidité, de la communauté microbienne présente dans le sol et des conditions ambiantes du sol (Diacono et al., 2010; Lehmann et al., 2015; Zakem et al., 2021).

#### 2.1.2.2 Effets de la MO sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols

La MO du sol joue un rôle important dans le maintien de la fertilité des sols en améliorant les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Sequi, 1989 cité par Diacono et al., 2010).

La MO contribue à la fertilité des sols en ayant une influence positive sur les propriétés physiques du sol (Mustin, 1987). La MO augmente le pouvoir de rétention en eau des sols (Mustin, 1987; Diacono et al., 2010; Lehmann et al., 2015), à des degrés divers selon sa nature (Mustin, 1987). L'apport de MO au sol améliore la stabilité des agrégats (Mustin, 1987; Lehmann et al., 2015; Chenu et al., 2018) grâce à la stimulation de l'activité microbienne (Cosentino et al., 2006). L'apport de MO au sol améliore la porosité du sol et diminue sa densité apparente (Mustin, 1987; Thibault et al., 2018).

La MO influence les propriétés chimiques des sols (Mustin, 1987). Plus un sol est riche en MO, plus son pouvoir tampon est fort, autrement dit, un sol riche en MO est capable de résister aux variations

induites du pH du sol (Mustin, 1987). La CEC est élevée dans les sols riches en MO puisqu'elle porte des charges négatives capables de fixer les cations présents en solution dans le sol et de les rendre disponibles pour la plante (Schvartz et al., 2005; Diacono et al., 2010). La MO du sol maintient la fertilité chimique du sol car elle apporte des nutriments lors de sa minéralisation (Chenu et al., 2018) et elle augmente la rétention des nutriments (Diacono et al., 2010; Lehmann et al., 2015).

La MO, source d'énergie et de carbone utilisée par la plupart des êtres vivants du sol pour leur développement (Mustin, 1987; Schvartz et al., 2005), joue un rôle clé dans le maintien de la fertilité du sol (Tiessen et al., 1994). Les organismes du sol sont impliqués dans de nombreux processus fondamentaux du cycle des nutriments, de la dynamique structurale du sol, et offrent de multiples autres services (Bloem et al., 1997 cité par Sharma et al., 2011). La MO étant l'aliment des êtres vivants du sol, elle est à l'origine de leur activité biologique reconnue depuis longtemps comme essentielle au bon fonctionnement du sol (Mustin, 1987; Sharma et al., 2010).

### 2.1.3 Les enjeux actuels et futurs de la fertilité des sols

En plus de l'enjeu majeur que représente la gestion durable de la fertilité des sols pour le maintien d'une production agricole durable (Le Cam, 2019), elle a un rôle à jouer dans l'atténuation du réchauffement climatique (IPCC, 2019; Le Cam, 2019). Selon l'IPCC (2019), les méthodes de gestion des sols qui permettent d'atténuer le changement climatique ou de s'y adapter sont celles qui augmentent la teneur en MO du sol et réduisent l'érosion du sol et le lessivage des nutriments. Par exemple, la culture d'engrais verts et de plantes de couverture, la restitution des résidus de culture, le travail réduit ou nul du sol et le maintien de la couverture végétale par une meilleure gestion du pâturage sont des pratiques agricoles qui peuvent réduire l'érosion des sols et le lessivage des éléments nutritifs (IPCC, 2019).

## 2.2 LES BUTTES DE TYPE PERMACOLE : UNE RÉPONSE ADAPTÉE AU DÉFI D'UNE GESTION DURABLE DE LA FERTILITÉ ?

Il existe un intérêt croissant pour les nouvelles pratiques de gestion durable des terres qui exploitent les mécanismes biotiques naturels pour maintenir la fertilité des sols (Capowiez et al., 2009). Ces pratiques innovantes en maraîchage sont par exemple des techniques de travail du sol simplifiées, le travail sur planches permanentes, l'introduction de couverts végétaux, l'utilisation de paillis, la mise en place d'intercultures longues, ... (Le Cam, 2019).

La culture sur buttes permanentes est une technique agricole ancienne, pratiquée notamment par les défenseurs de la permaculture, qui se base sur l'activité biologique du sol et l'apport massif de MO pour assurer une production végétale durable. La culture sur butte permanente consiste à cultiver des légumes sur une surface volontairement surélevée par rapport au niveau du sol (Wallner, 2019). Le sol des buttes n'est pas travaillé (Wallner, 2019). Les buttes ont des formes et des compositions diverses et elles sont toujours recouvertes de paille ou de végétaux (Wallner, 2019). Elles peuvent être composées de terre ou bien il peut s'agir d'une accumulation particulière d'une grande masse de MO fraîche telle que de l'herbe, des branchages, du broyat, des troncs d'arbres, ... (Mustin, 1987; Wallner, 2019).

La butte en terre est composée de terre et recouverte de paille ou de végétaux (Anonyme, 2011). La culture sur buttes mulchées semble avoir été importée en France par Emilia Hazelip. Cette technique agricole, qui se base sur le non travail du sol et la couverture permanente du sol par des plantes ou du mulch, permettrait au sol de s'améliorer et de maintenir sa fertilité (Anonyme, 2011).

La butte sandwich de Robert Morez, aussi appelée « butte Morez » est composée de MO difficilement valorisables en agriculture tels que des branches, broussailles, ronces, épineux, feuilles, écorces recouvertes d'une couche de terre dans laquelle les plantations sont faites (Morez, n.d.). Elle permettrait de diminuer les apports en eau par rapport à une agriculture classique et d'augmenter la productivité d'environ cinquante pourcent par rapport à une culture traditionnelle (Morez, n.d.). Elle serait productive durant quatre ans sans apport de fertilisant (Morez, n.d.).

La culture sur butte forestière (ou Hügelkultur en allemand) consiste à empiler des matériaux ligneux tels que des rondins de bois, des débris de jardin tels que de l'herbe, des feuilles et des branchages et ensuite de les recouvrir de terre pour former un monticule, une butte, sur laquelle il est possible de cultiver directement (Adams et al., 2013; Laffoon, 2016; Chalker-Scott, 2017). Une thèse de Laffoon (2016) a montré que ce type de butte augmente la capacité de rétention en eau du sol. Les buttes forestières (ou hugel mounds en anglais) offriraient d'autres avantages tels que l'amélioration de la fertilité du sol, un meilleur drainage, une augmentation des populations microbiennes et une meilleure aération du sol (Miles, 2010; Adams et al., 2013). Selon Miles (2010), la culture sur buttes forestières est particulièrement bien adaptée aux sols difficiles à cultiver ou aux zones urbaines. Les buttes forestières auraient une durée de vie de cinq à six ans (Chalker-Scott, 2017).

La butte en lasagne (ou lasagna bed en anglais), mise au point par Patricia Lanza (Anonyme, 2021), est composée d'une succession de couches de MO riches en carbone tels que des feuilles sèches ou du foin en alternance avec des couches de MO riches en N tels que de l'herbe ou des feuilles vertes (Foudral, May-24-2021). Le tout est recouvert d'une couche de terre (Anonyme, 2021). Cette technique permettrait de créer un sol cultivable sur du béton, une terrasse ou un balcon (Anonyme, 2021) et d'enrichir ou d'améliorer un sol difficile à cultiver (Anonyme, 2021). La décomposition de la MO fraîche dans la butte en lasagne provoquerait une montée en température qui permettrait une production végétale « rapide et généreuse » (Anonyme, 2021).

Pour résumer, la culture sur butte aiderait à améliorer les conditions environnementales pour les plantes cultivées ainsi que la fertilité du sol sur le long terme (Wallner, 2019). La butte augmente la hauteur du substrat pour les racines et sa forme arrondie favoriserait le réchauffement du sol grâce à une meilleure captation des rayons du soleil (Wallner, 2019). Il semblerait que les buttes permanentes améliorent significativement la capacité de rétention en eau du sol (Laffoon, 2016) et offrent un bon système de drainage en cas de pluie (Wallner, 2019). La culture sur butte offrirait l'avantage d'un sol plus aéré (Wallner, 2019). La butte permanente serait un système auto-fertile qui s'appuie sur une activité biologique du sol intense qui digère continuellement la MO apportée, rendant ainsi les nutriments disponibles pour les plantes et améliorant la fertilité du sol (Wallner, 2019).

La culture sur butte permanente pourrait être une pratique agricole adaptée au défi d'une gestion durable de la fertilité des sols. Cependant, le manque de documentation scientifique concernant les buttes de type permacole ne permet pas de l'affirmer.

## 2.3 LES INDICATEURS DE FERTILITÉ DES SOLS

Pour évaluer la fertilité du sol, une combinaison de propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol est analysée (Sharma et al., 2010; Gayan et al., 2020). Pour évaluer les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols, des indicateurs sont utilisés (Bockstaller et al., 2009 cité par Thibault et al., 2018).

### 2.3.1 Indicateurs chimiques

Les propriétés chimiques du sol peuvent être évaluées par la mesure d'indicateurs tels que la teneur en éléments nutritifs du sol, la teneur en carbone organique total (COT) du sol, le rapport C/N, la capacité d'échange cationique (CEC), le pH du sol, ou encore le taux de saturation du complexe d'échange (Sharma et al., 2010; Thibault et al., 2018).

Pour se nourrir, les plantes ont besoin de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'N minéral, de K, de Ca, de Mg, de P, de soufre et d'autres micronutriments (Tisdale et al., 1993; Schwartz et al., 2005). Le carbone, l'hydrogène et l'oxygène sont prélevés dans l'air et dans l'eau tandis que les autres éléments nutritifs sont puisés dans le sol via les racines (Schvartz et al., 2005). La teneur en éléments nutritifs du sol est donc un indicateur important de la fertilité du sol.

Le dosage du COT est une mesure de la teneur en MO du sol (Mustin, 1987; Thibault et al., 2018). En effet, la MO est composée d'environ 58% de CO (ce pourcentage peut varier selon les conditions édaphiques) (Trigalet et al., 2017). La teneur en MO des sols est un indicateur de base de leur qualité (Genot et al., 2012) en raison de sa grande influence sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Reeves, 1997). L'amélioration du statut organique du sol entraîne une amélioration des propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (Mustin, 1987; Reeves, 1997 cité par Thibault et al., 2018). Selon Mustin (1987), il n'y a pas de limite agronomique supérieure pour la teneur en MO du sol.

Le rapport C/N informe sur la dynamique d'évolution de la MO du sol (Thibault et al., 2018). Un rapport C/N idéal se situe entre 9 et 10 (Thibault et al., 2018). Un rapport C/N faible indique une dégradation rapide de la MO tandis qu'un rapport C/N élevé traduit une décomposition lente de la MO (Tisdale et al., 1993). Les microorganismes qui décomposent la MO ont besoin d'N (Tisdale et al., 1993). Si la MO apportée au sol a un rapport C/N faible, elle apporte suffisamment d'N aux microorganismes du sol, permettant une croissance rapide de la population microbienne qui décompose alors rapidement la MO (Tisdale et al., 1993). Un rapport C/N élevé signifie que la MO ne contient pas assez d'N pour permettre la décomposition du carbone (Tisdale et al., 1993). L'activité biologique est réduite, les microorganismes prélèvent l'N dans le sol pour se nourrir et poursuivent lentement la décomposition de la matière carbonée (Tisdale et al., 1993).

La CEC est la quantité totale de cations échangeables ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) qui peuvent être adsorbés sur certains constituants solides du sol porteurs de charges tels que les MO, les oxydes de fer ou d'aluminium et certains minéraux argileux comme la kaolinite (Schvartz et al., 2005). Elle varie dans le temps (Schvartz et al., 2005). La plupart des cations échangeables, sauf  $\text{Al}^{3+}$ , sont des nutriments pour les plantes (Tisdale et al., 1993). Plus un sol est riche en argiles et en MO, plus sa capacité à adsorber des cations est grande (Mustin, 1987). Plus un sol est riche en sable et pauvre en MO, plus sa CEC est faible (Mustin, 1987).

Le pH est une mesure de l'acidité du sol (Schvartz et al., 2005). Le pH optimal pour la production végétale est d'environ 6,5 (Tisdale et al., 1993). Les sols cultivés s'acidifient naturellement au cours du temps sous l'action de l'activité microbienne, de la pluie, etc (Schvartz et al., 2005). Le pH d'un sol influence la capacité de ses constituants porteurs de charges à piéger ou libérer les cations (Schvartz et al., 2005). Par exemple, lorsqu'un sol s'acidifie, les cations nutritifs sont remplacés par des protons  $\text{H}^+$  sur le complexe d'échange, laissant les cations nutritifs dissous dans la solution du sol vulnérables à la lixiviation (Schvartz et al., 2005). Si le pH descend jusqu'à des valeurs suffisamment faibles pour solubiliser les minéraux contenant de l'aluminium, le complexe d'échange peut se charger en cations  $\text{Al}^{3+}$  toxiques pour les plantes (Tisdale et al., 1993; Schvartz et al., 2005). Le pH du sol affecte également la distribution et la fonction des micro-organismes du sol (Wang et al., 2019). Les microorganismes

telluriques ont une gamme optimale de pH autour de 7 (Mustin, 1987). La gamme optimale de pH diffère d'un groupe taxonomique à l'autre (Wang et al., 2019). Les bactéries ont leur optimum de pH compris entre 6 et 8, tandis que les champignons tolèrent une gamme de pH plus large allant de 5 à 8,5 environ (Mustin, 1987).

Le taux de saturation d'un sol est le pourcentage de la CEC occupée par des cations basiques tels que  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  (Tisdale et al., 1993; Schwartz et al., 2005). Plus le taux de saturation est élevé, plus il y a de cations nutritifs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) disponibles pour les plantes (Tisdale et al., 1993). Le taux de saturation est lié au pH (Tisdale et al., 1993). Lorsque le pH est bas, le taux de saturation du complexe d'échange l'est aussi (Tisdale et al., 1993; Schwartz et al., 2005).

### 2.3.2 Indicateurs physiques

Les propriétés physiques des sols sont mesurées à l'aide d'indicateurs tels que la texture, la structure, la stabilité des agrégats, la porosité, la densité apparente, la teneur en eau du sol ou encore l'eau disponible pour les plantes (Sharma et al., 2010; Araya et al., 2021).

La texture du sol est la proportion de sables, limons et argile du sol (Gros, 1979; Schwartz et al., 2005). La proportion et la nature des argiles dans un sol influencent la CEC du sol, très importante sur le plan de la nutrition des plantes (Radcliffe et al., 2010; Thibault et al., 2018). La texture du sol influence également la teneur en eau et le potentiel hydrique du sol (Radcliffe et al., 2010).

La structure du sol fait référence à la disposition des particules de sable, de limon et d'argile les unes par rapport aux autres (Schvartz et al., 2005). La structure du sol joue un rôle important dans son fonctionnement (Bronick et al., 2005). La structure du sol influence la teneur en eau et le potentiel hydrique du sol (Radcliffe et al., 2010), donc la disponibilité en eau pour les plantes. Elle influence également la distribution spatiale des racines (Pardo et al., 2000), la sensibilité à l'érosion du sol et la porosité (Six et al., 2000; Bronick et al., 2005).

L'agrégation est le processus par lequel les particules minérales et organiques s'associent pour former des agrégats (Jangorzo, 2013). Selon Cosentino (2006), la stabilité des agrégats est la capacité d'un sol à maintenir l'arrangement spatial des agrégats et des vides lorsqu'il est exposé à différents stress tels qu'une pluie.

Selon Bronick et al. (2005), « *une structure du sol favorable et une stabilité élevée des agrégats sont importantes pour améliorer la fertilité du sol, augmenter la productivité agronomique, améliorer la porosité et diminuer l'érodabilité.* ».

La porosité du sol est la proportion du volume de sol occupée par des vides (Schvartz et al., 2005). C'est dans la porosité du sol que s'effectuent les échanges de gaz entre le sol et l'atmosphère (Schvartz et al., 2005). Les organismes aérobies du sol ont besoin d'oxygène pour dégrader la MO qui leur sert de nourriture (Mustin, 1987), d'où l'importance d'avoir une bonne porosité. La porosité intervient également dans la distribution et la disponibilité de l'eau (Kibblewhite et al., 2008). Selon Mustin (1987), « *une bonne porosité améliore le drainage naturel des sols sans modifier leur réserve utile en eau* ». La porosité est l'habitat des microorganismes du sol (Kibblewhite et al., 2008). L'état d'aération du sol a également des effets sur les plantes (Gliński et al., 2018). En effet, les racines ont besoin d'un sol bien aéré pour croître sainement (Hatfield et al., 2017). La porosité a donc une importance capitale dans la fertilité des sols.

La densité apparente sèche est un indicateur de l'aération du sol et de la résistance mécanique à la croissance des racines (Reynolds et al., 2008). Une densité apparente trop élevée peut entraîner une

baisse du rendement des plantes en raison d'une moins bonne aération et/ou d'une trop grande résistance mécanique à l'élongation des racines (Reynolds et al., 2008).

L'eau disponible pour les plantes est « *la quantité d'eau maximale retenue par un sol qui serait disponible pour les plantes* » (Radcliffe et al., 2010). Elle correspond à la différence entre la teneur en eau du sol à la capacité au champ et la teneur en eau du sol au point de flétrissement permanent (Schvartz et al., 2005; Radcliffe et al., 2010). L'eau disponible pour les plantes varie avec la texture (Radcliffe et al., 2010). Elle peut être estimée grâce à la courbe de rétention en eau du sol, qui relie la teneur en eau et le potentiel hydrique du sol (Radcliffe et al., 2010).

La teneur en eau du sol correspond au volume de sol occupé par de l'eau (Radcliffe et al., 2010). Elle influence notamment la disponibilité des éléments nutritifs du sol (Schvartz et al., 2005), la température du sol, la présence ou l'absence d'air dans la porosité du sol, le ruissellement, l'infiltration de l'eau (Radcliffe et al., 2010). L'eau est indispensable à la vie des organismes du sol (Mustin, 1987).

### 2.3.3 Indicateurs biologiques

Les indicateurs biologiques du sol mesurent la quantité, l'activité et la diversité de la faune et de la flore du sol (Sharma et al., 2010). Ce sont principalement l'activité enzymatique dans la rhizosphère, la respiration du sol, la biomasse fongique et microbienne, la diversité microbienne (proportion des champignons et des bactéries), la diversité taxonomique microbienne, la biomasse et la diversité des lombriciens, et la colonisation des racines des plantes par les CMA (Sharma et al., 2010; Thibault et al., 2018).

Les microorganismes telluriques sont d'une importance capitale pour le fonctionnement du sol (Sharma et al., 2010) et la nutrition des plantes (Jacoby et al., 2017). Ils sont impliqués dans toute une série de processus notamment dans le cycle des nutriments (Sharma et al., 2010). En milieu naturel, la plupart des éléments nutritifs présents dans le sol ne sont pas directement utilisables par les plantes car ils sont liés à des molécules organiques (Jacoby et al., 2017). Les microorganismes sont capables de dépolymériser et minéraliser la MO présente dans le sol grâce à la production d'enzymes (Romaní et al., 2006), libérant ainsi les nutriments sous des formes inorganiques directement utilisables par les plantes (Jacoby et al., 2017). Certains microorganismes peuvent même stimuler la croissance des plantes en améliorant leur nutrition minérale (Jacoby et al., 2017). C'est le cas des CMA qui s'associent avec le système racinaire des plantes pour leur délivrer l'eau et les éléments minéraux dont elles ont besoin, tels que le P et le N, et recevoir du sucre en échange (Sharma et al., 2010). Les CMA peuvent même augmenter la tolérance au stress et aux maladies des plantes colonisées (Gosling et al., 2006 cité par Sharma et al., 2011). Certains microorganismes du sol sont impliqués dans la fixation de l'N atmosphérique (Jacoby et al., 2017). Les microorganismes jouent également un rôle dans la structure du sol. En effet, les bactéries et champignons exsudent des polysaccharides et des substances hydrophobes qui renforcent la cohésion interne et l'hydrophobie des agrégats, augmentant ainsi leur stabilité (Cosentino et al., 2006). Certains microorganismes de la rhizosphère repoussent les agents pathogènes des plantes (Mendes et al., 2013). Un niveau élevé de diversité biologique caractérise un sol sain (Sharma et al., 2010). La biomasse et la diversité des microorganismes du sol sont donc des indicateurs importants de la fertilité des sols.

Les enzymes présentes dans la rhizosphère décomposent la MO et minéralisent les éléments nutritifs utiles aux plantes (Zhang et al., 2012). Un sol avec un niveau élevé d'activité enzymatique dans la rhizosphère est un sol sain (Sharma et al., 2010). Les enzymes de la rhizosphère peuvent être produites par les végétaux et excrétées via les racines, produites et excrétées par les microorganismes du sol en activité (exoenzymes), ou libérées lors de la mort ou de la destruction des cellules productrices (endoenzymes) (Mustin, 1987).

La respiration du sol est un indicateur représentatif de l'activité des organismes du sol aérobies (Zhang et al., 2012). Une respiration élevée indique une bonne activité biologique du sol (Zhang et al., 2012).

### 3 OBJECTIFS DU TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES

---

À l'heure actuelle, il existe peu d'articles scientifiques qui déterminent les effets de la culture sur butte sur la fertilité du sol à long terme, jugés bénéfiques par ses utilisateurs. L'objectif de ce travail de fin d'études est de contribuer à l'évaluation de la fertilité de différents types de buttes permanentes de style permacole. Ce travail s'inscrit dans un essai longue durée qui s'intéresse à l'impact de la culture sur buttes permanentes sur la fertilité du sol à long terme.

Quatre types de buttes permanentes s'inspirant des principales techniques de buttes de permaculture connues ont été choisis pour cet essai en plus d'un témoin. Il s'agit de la butte-sandwich de Robert Morez, de la butte en terre d'Emilia Hazelip, de la butte en lasagne mise au point par Patricia Lanza et de la butte forestière vulgarisée par Sepp Holzer (Holzer, 2011).

Les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol des buttes, ainsi que le rendement et la croissance des cultures mises en place, ont été étudiées.



## 4 MATÉRIEL ET MÉTHODES

---

### 4.1 LOCALISATION DE L'ESSAI

L'essai est situé sur la parcelle dédiée au jardinage et à l'horticulture de la plateforme Wallonne de Systèmes innovants en Agriculture et Biodiversité urbaine (WASABI), au cœur du campus de Gembloux Agro-Bio Tech ULiège (Figure 2). Le sol y est un limon fin non battant (pas de problème de stabilité structurale).



*Figure 2 : Parcelle maraîchère WASABI.*

### 4.2 CONDITIONS CLIMATIQUES

Le climat tempéré de la Belgique est généralement caractérisé par des hivers doux et pluvieux et des étés frais et humides. A Gembloux, 793,4 mm de précipitations tombent en moyenne par an et la température moyenne annuelle est de 10,2°C selon les données de l'IRM (IRM, 2020).

### 4.3 FACTEURS ÉTUDIÉS

L'objectif de l'essai est d'évaluer le rendement et les propriétés physico-chimiques et biologiques de différents types de buttes de style permacole. Les quatre types de buttes qui ont été mises en place, en plus du témoin, sont la butte en terre, la butte sandwich de Robert Morez, aussi appelée « butte Morez », la butte forestière et la butte en lasagne. Ces buttes diffèrent par leur composition qui est illustrée dans la Figure 3. La terre de fond et la terre de surface sont identiques et proviennent toutes deux du site où les buttes sont implantées. Chaque butte a été construite dans un cadre en bois de 4,20 mètres de long, 1,20 mètres de large et 0,60 mètres de haut. Excepté le lombricompost et la paille de chanvre, les MO utilisées pour composer les buttes proviennent exclusivement des alentours de la plateforme maraîchère WASABI.

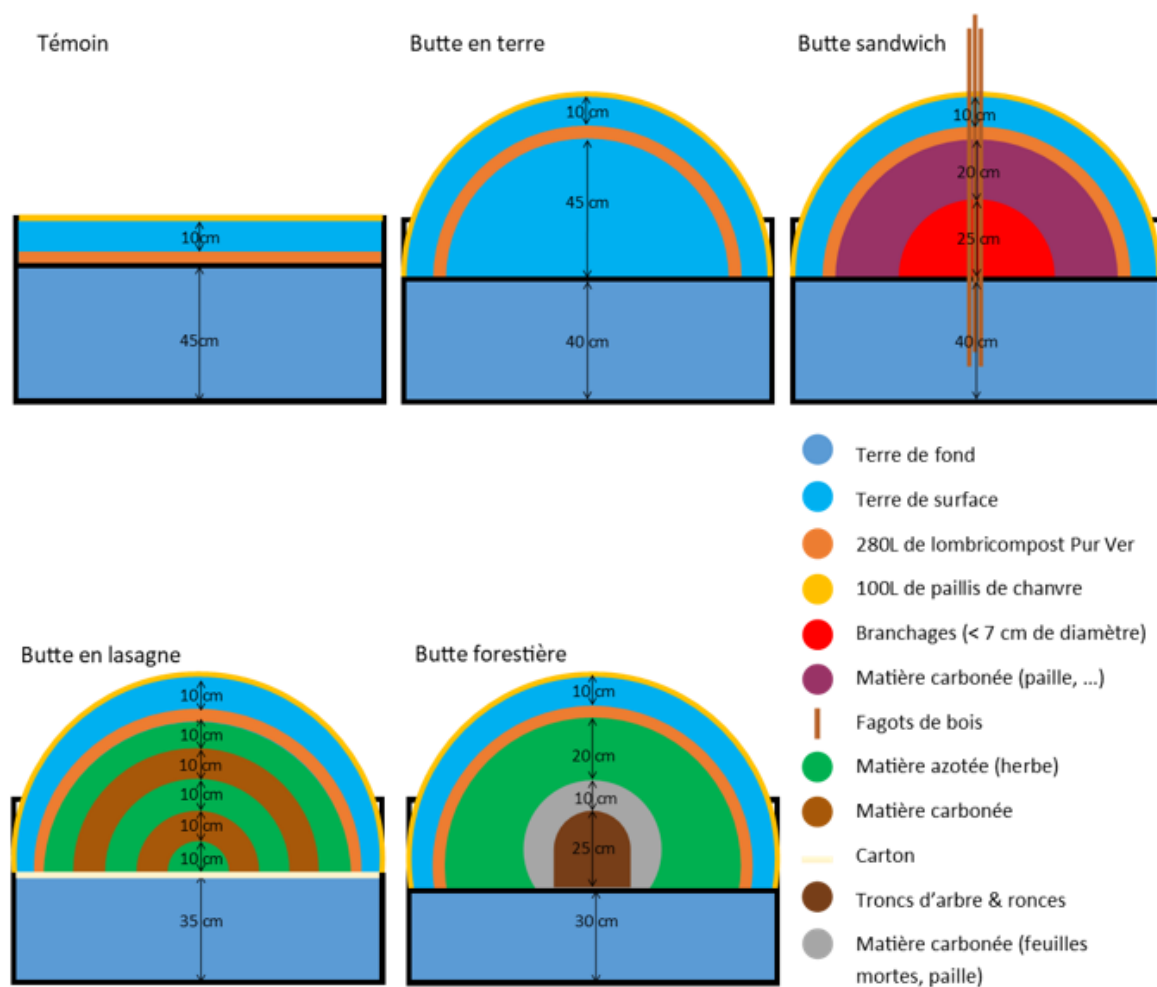


Figure 3 : Illustration de la composition des différents types de buttes et du témoin (coupe transversale).

#### 4.4 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Il s'agit d'un dispositif en trois blocs aléatoires complets formant chacun une entité spatiale contiguë. Sur la Figure 4 est indiquée la période de construction de chaque butte en dessous de son identifiant : « avs2020 » pour les buttes construites de mai à août 2020 ; « aps2020 » pour les buttes construites de septembre à décembre 2020 ; « avs2021 » pour les buttes construites de mars à mai 2021. Les buttes portant un astérisque (\*) sur la Figure 4 ont été cultivées en juillet 2020. Les buttes portant deux astérisques (\*\*) sur la Figure 4 ont été cultivées en septembre 2020.

Les buttes n°2 (A2, B2, C2, ...) ayant toutes été construites sur la même période et n'ayant pas encore reçu de culture forment à elles seules un dispositif complet idéal pour étudier l'effet du type de butte sur le rendement des cultures et la fertilité du sol. Les variables mesurées et traitées dans ce travail concernent donc principalement les buttes n°2, bien que toutes les buttes aient été cultivées de la même manière pour assurer l'homogénéité du dispositif pour les prochaines années de l'expérimentation. Les prélèvements destructifs, tels que les prélèvements de sol en structure conservée et les prélèvements de racines, ont tout de même été réalisés sur les buttes n°1.



Figure 4 : Schéma du dispositif en blocs aléatoires complets. \* buttes sur lesquelles on a fait pousser un mélange de légumes en juillet 2020. \*\* buttes sur lesquelles on a fait pousser un mélange de légumes en septembre 2020.

#### 4.5 MISE EN PLACE DES CULTURES

Les mêmes légumes ont été plantés/semés sur toutes les buttes. Le principe des buttes de type permacole étant de diversifier au maximum la production, cinq espèces de légumes ont été sélectionnées : le pois mangetout de Grace®, la laitue Tobelo®, l'épinard Harp®, l'oignon tige Totem® et le fenouil Prelude®. Ces légumes ont été choisis sur base des observations faites l'année précédente sur les buttes cultivées et sur base de différents critères tels que la date de récolte, la profondeur d'enracinement, l'association entre les cultures, ...

Les plants d'épinards, de laitues, de fenouils et d'oignons tiges ont été produits par le Centre Technique Horticole de Gembloux. Tous les plants d'une espèce sont issus de semis réalisés au même moment.

La Figure 5 montre le plan de culture d'une butte. Contrairement à ce qui se fait habituellement sur les buttes, les cultures ont été implantées sur des lignes parallèles à la largeur de la butte, ceci afin d'éviter que les racines ne se mélangent de trop et ainsi pouvoir faire plus aisément des analyses sur les racines de pois.

Par butte, 21 mottes d'oignons tiges et 21 mottes d'épinards ont été repiquées tous les 15 cm sur 3 lignes, soit 7 mottes par ligne. Les oignons tiges et les épinards ont été semés au CTH les 5 mars et 15 avril respectivement.

8 plants de fenouils ont été repiqués par butte tous les 30 cm sur 2 lignes, soit 4 plants de fenouils par ligne par butte. Les fenouils ont été semés au CTH le 6 avril.

Par butte, 72 graines de pois mangetout ont été semés tous les 3 cm à 5 cm de profondeur sur 2 lignes, soit 36 graines par ligne.

12 plants de laitues ont été repiqués par butte tous les 30 cm sur 3 lignes, soit 12 plants de laitues par ligne par butte. Les laitues ont été semées au CTH le 25 mars.

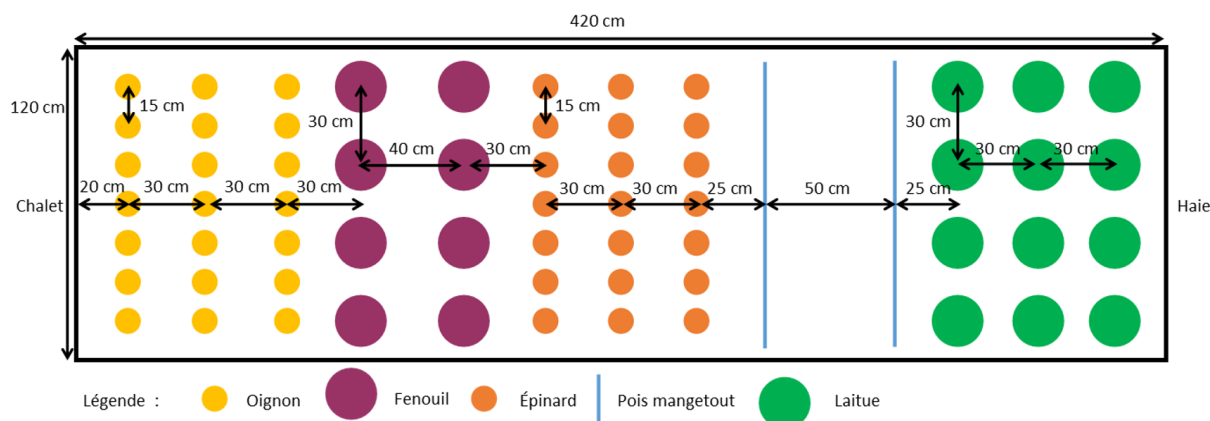


Figure 5 : Plan de culture d'une butte vue de haut.

Le Tableau 1 reprend les dates de semis et de repiquage.

Tableau 1 : Calendrier des semis et repiquages des légumes cultivés sur les buttes

Date	Opérations culturales
05-mars-21	Semis des pois mangetout de Grace® sur toutes les buttes, excepté O3, H3, C3, E3, D3, J3, B3 et M3
23-mars-21	Semis pois mangetout de Grace® sur butte O3
24-mars-21	Semis pois mangetout de Grace® sur butte H3
16-avril-21	Repiquage des oignons tiges Totem® sur toutes les buttes, excepté J3, B3 et M3
20-avr-21	Semis pois mangetout de Grace® sur buttes C3 et E3
22-avr-21	Repiquage des laitues Tobelo® sur toutes les buttes, excepté J3, B3 et M3
23-avr-21	Semis pois mangetout de Grace® sur butte D3
30-avr-21	Repiquage des épinards Harp® sur toutes les buttes, excepté B3 et M3
03-mai-21	Repiquage des laitues Tobelo® et oignons tige Totem® sur J3
04-mai-21	Semis pois mangetout de Grace® sur butte J3
12-mai-21	Repiquage des fenouils Prelude® sur toutes les buttes Repiquage des oignons tiges Totem®, laitues Tobelo® et épinards Harp® sur B3 et M3
18-mai-21	Semis pois mangetout de Grace® sur buttes B3 et M3

Certaines buttes n'ont pas pu être semées/plantées en même temps que les autres car elles n'étaient pas encore construites au moment du semi/repiquage. Les buttes H3 et O3 ont été construites en mars, C3 E3 D3 et J3 en avril et M3 et B3 en mai 2021.



## 4.6 SUIVI DE LA CULTURE DE POIS

### 4.6.1 Observation des levées et des stades de développement des pois mangetout

Les 23 avril et 6 mai 2021, un relevé des stades de développement des pois mangetout de Grace® a été réalisé suivant l'échelle BBCH pour les pois (Figure 6). Pour les deux relevés, le stade de chaque plant des buttes observées a été noté, permettant par la même occasion d'obtenir le nombre de pois levés par butte.

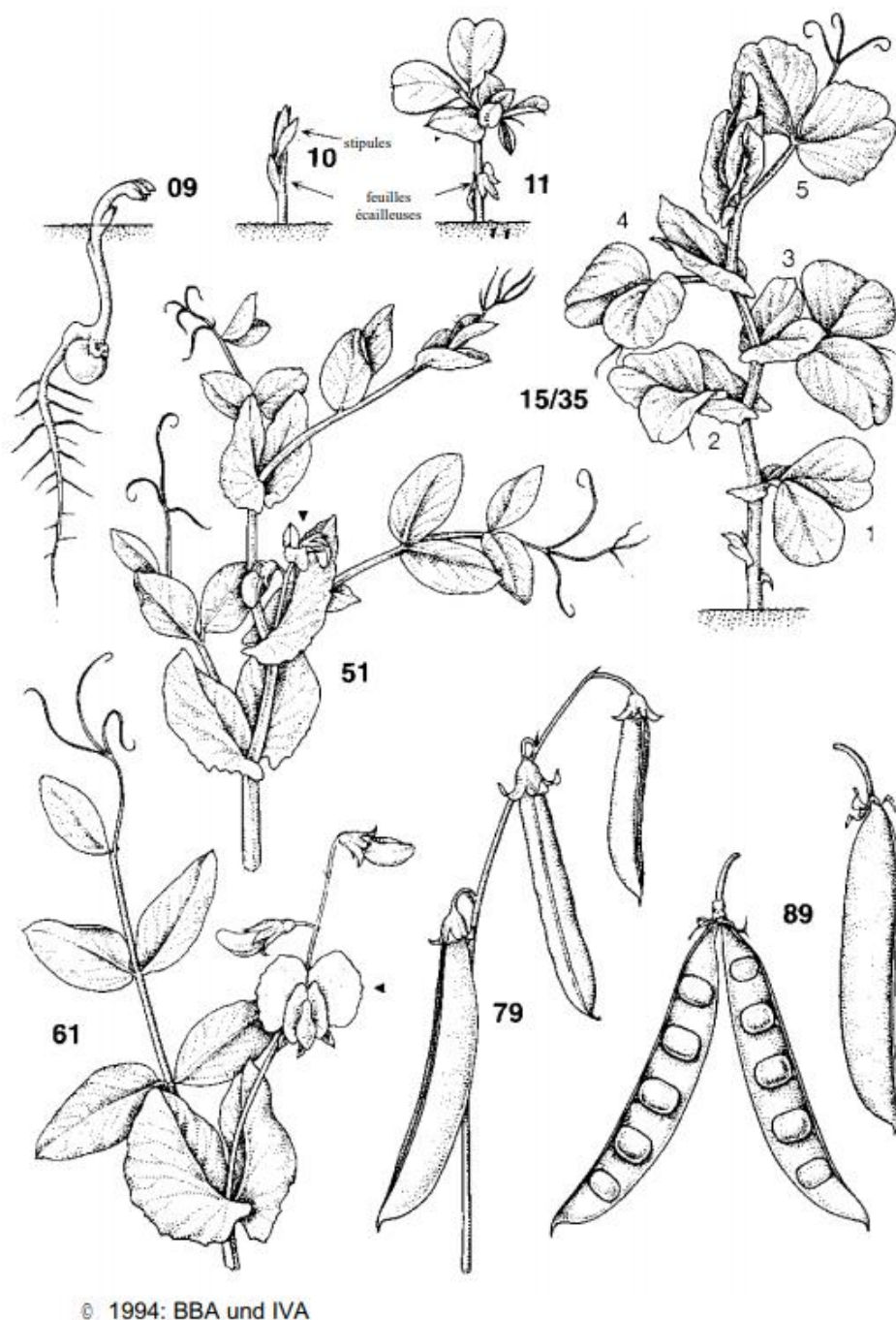


Figure 6 : Illustration des stades phénologiques des pois selon l'échelle BBCH (Meier, 2001).

#### 4.6.2 Nodosités et mycorhizes dans les racines de pois

##### 4.6.2.1 Echantillonnage

Le 8 juin, trois plants de pois au stade floraison et leurs racines ont été prélevés sur chaque butte n°1. Pour ce faire, un carré de terre à prélever comprenant 3 plants de pois a été délimité à l'aide d'une bêche, puis tout le sol compris dans ce carré sur une profondeur de 30 cm (taille de la bêche) a été prélevé et mis en sac. Les racines de pois ont ensuite été nettoyées au tuyau d'arrosage sur un tamis (Figure 7). Une fois propres, les racines ont été stockées dans de l'éthanol à 70% à température ambiante.



Figure 7 : Nettoyage des racines de pois au tuyau d'arrosage.

##### 4.6.2.2 Comptage des nodosités

Le 9 juin, le nombre de nodosité par plant de pois a été déterminé. Pour effectuer le comptage, chaque nodosité a été retirée de la racine à l'aide d'une pince après avoir été comptée. Une fois toutes les nodosités de la racine comptées, la racine a été remise dans son Falcon avec de l'éthanol 70%.

##### 4.6.2.3 Coloration des mycorhizes

La coloration des racines de pois a été réalisée les 10 et 11 juin suivant la méthodologie de Vierheilig et al. (1998). Les racines ont été coupées en tronçons d'environ 2 cm de long. Les grosses racines ont été retirées de l'échantillon. Les racines coupées et triées ont été blanchies au KOH 10% pendant 45 minutes au bain marie à 80°C. Après trois rinçages à l'eau du robinet, les racines ont été acidifiées à l'HCl 1% pendant 30 minutes à température ambiante puis rincées une fois à l'eau du robinet. Pour la coloration, les racines ont ensuite été trempées dans une solution d'acide acétique 7% et d'encre noire de la marque Parker® pendant 30 minutes à température ambiante, puis une nuit à température ambiante. Les racines colorées ont ensuite été rincées 3 fois à l'eau du robinet puis conservées dans du glycérol 50% à température ambiante.

##### 4.6.2.4 Abondance des CMA dans les racines de pois

Pour chaque échantillon analysé, les racines colorées ont été coupées en fragments d'environ 1 cm de long, ensuite, 30 fragments ont été étalés sur une lame de microscope parallèlement côte à côte. Les fragments ont été observés au microscope un par un et pour chacun d'eux, le niveau de colonisation mycorhizienne ainsi que l'abondance des arbuscules ont été évalués selon la méthode de Trouvelot et al. (1986) suivant les classes indiquées sur la Figure 8.

Ces valeurs ont servi à calculer la fréquence des mycorhizes, l'intensité de la colonisation

mycorhizienne et l'abondance d'arbuscules dans le système racinaire des pois.

Tous les échantillons n'ont pas pu être analysés par manque de temps. 6 échantillons de racines de pois, 3 provenant de buttes sandwich et 3 provenant de témoins, ont été analysés pour avoir des résultats préliminaires et observer d'éventuelles tendances.

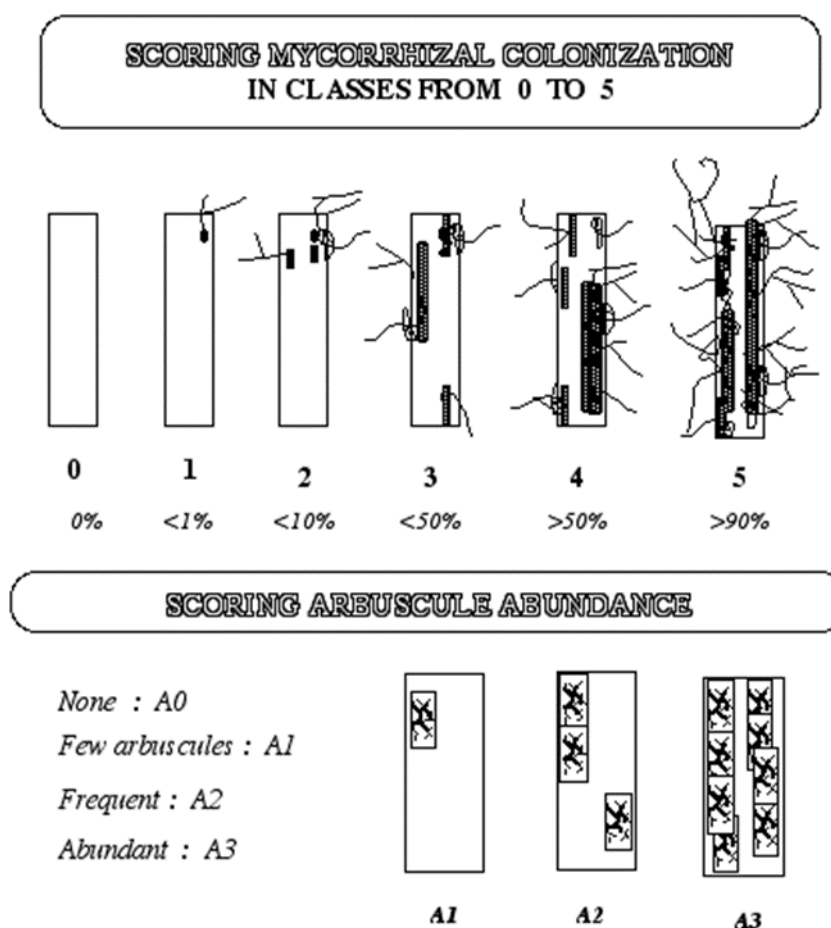


Figure 8 : Classes pour l'estimation du niveau de colonisation mycorhizienne et de l'abondance des arbuscules pour chaque fragment de racine.

## 4.7 RÉCOLTES ET QUANTIFICATION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE

Les dates des récoltes sont reprises dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Calendrier des récoltes

Date	Opérations culturales
01-juin-21	Récolte épinards Harp®
14-juin-21	Récolte laitues Tobelo®
07-juil-21	Récolte pois mangetout de Grace® sur les buttes n°2 et A1
08-juil-21	Récolte pois mangetout de Grace® sur buttes n°1 et sur A3, F3, G3, I3, K3, L3 et N3
12-juil-21	Récolte oignons tiges Totem®
13-juil-21	Récolte fenouils Preludio®

### 4.7.1 Épinards

Avant la récolte des épinards, la hauteur de six plants d'épinards par butte n°2 a été mesurée. Les épinards ont été coupés au ras du sol puis mis en sachet par butte. Après la récolte, la biomasse fraîche

des épinards pour chaque butte a été pesée. Ensuite les plantes ont été mises à l'étuve à 60°C pendant au moins 120h. Une fois que les épinards ont atteint un poids constant, ils ont été sortis de l'étuve puis pesés butte par butte. Lorsqu'une (des) mottes étai(en)t morte(s) sur une butte, la biomasse de cette butte a été écartée du jeu de données.

#### 4.7.2 Laitues

Les laitues ont été coupées au collet. Les plus grosses laitues ont été coupées en morceaux pour diminuer le temps de séchage. Chaque laitue coupée a été mise individuellement dans un sachet à étuve. Les laitues ont ensuite été pesées individuellement puis mises à l'étuve à 70°C pendant 72h. Une fois que les laitues ont atteint un poids constant, elles ont été sorties de l'étuve puis à nouveau pesées individuellement.

#### 4.7.3 Pois mangetout

Les oiseaux ayant mangé une bonne partie des plants de pois, seules les gousses ont été récoltées. Les gousses ont été mises en sachet par butte puis pesées. Ensuite elles ont été mises à l'étuve à 65°C pendant au moins 120h. Une fois que les gousses ont atteint un poids constant, elles ont été sorties de l'étuve puis pesées butte par butte.

#### 4.7.4 Oignons tiges

Les oignons tiges ont été arrachés par mottes. Les racines ont été coupées et laissées sur la butte. Les oignons ont été pesés frais par bottes de 5 oignons. Pour chaque type de butte, la taille de 6 oignons tiges a été mesurée.

#### 4.7.5 Fenouils

Les fenouils ont été coupés au collet. Ils ont été pesés frais individuellement avec leurs fanes.

### 4.8 ANALYSES DU « (TECHNO)SOL »

#### 4.8.1 Caractéristiques chimiques du sol

##### 4.8.1.1 Échantillonnage

Le sol des buttes a été échantillonné le 3 mai. 14 échantillons composites ont été réalisés. Chaque échantillon composite a été formé en mélangeant 9 échantillons de terre prélevés au sommet de 3 buttes de la même composition et du même numéro. Par exemple, 3 prélèvements ont été réalisés au sommet de la butte forestière C1 (Figure 9), 3 prélèvements au sommet de E1 et 3 prélèvements au sommet de J1 puis les 9 prélèvements ont été mélangés ensemble pour former l'échantillon composite « forestière 1 ». 500g de chaque échantillon composite ont été mis en sachets séparés pour l'analyse chimique. Chaque prélèvement a été réalisé à l'aide d'une gouge de 3 cm de diamètre sur une profondeur de 60 cm (excepté dans les buttes sandwich et forestières où il était difficile d'aller plus profondément que 40 cm).

Les échantillons frais ont été déposés au pôle « Laboratoires d'analyses agricoles » à La Hulpe pour l'analyse du P, du K, du Mg, du Ca, du pH<sub>KCl</sub>, du CO<sub>3</sub>, de l'N total et du rapport C/N.



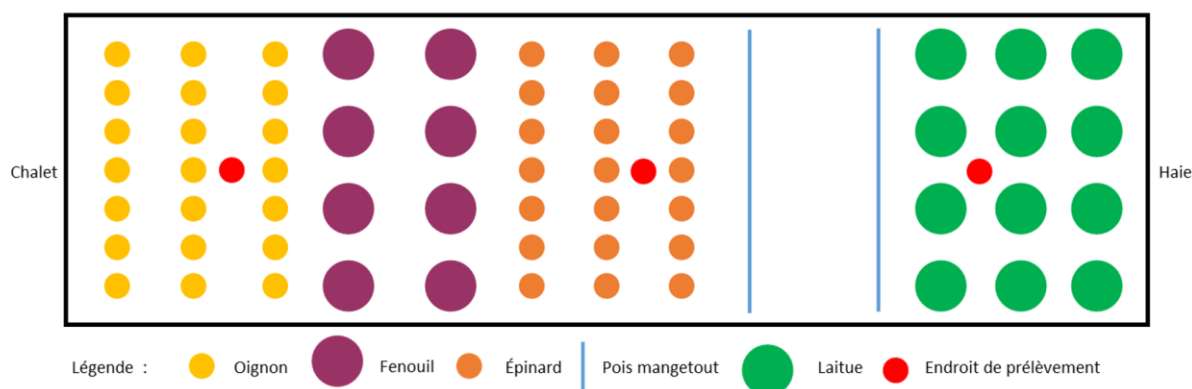


Figure 9 : Illustration des endroits de prélèvements de terre pour l'analyse chimique sur une butte.

#### 4.8.1.2 Détermination de la CEC, des bases échangeables et du taux de saturation

Les échantillons prélevés le 3 mai ont été récupérés secs et broyés à 2 mm au laboratoire de La Hulpe après les analyses. Ce sol a été utilisé pour la détermination de la CEC, de la concentration en bases échangeables et du taux de saturation du complexe d'échange.

Pour chaque échantillon, 5 g de sol sec broyé à 2 mm ont été agités avec 30 ml d'acétate d'ammonium 1M pendant 2h afin d'extraire les cations basiques échangeables. Après centrifugation pendant 10 minutes à 3000T, le surnageant a été récupéré. Afin d'être certain de récupérer toutes les bases échangeables et de saturer au maximum le complexe d'échange en ammonium, l'opération suivante a été réalisée deux fois : 30 ml d'acétate d'ammonium 1M ont été ajoutés dans le tube contenant l'échantillon de terre, le tout a été mélangé énergiquement pour décoller le culot puis centrifugé pendant 10 minutes à 3000 T pour récupérer le surnageant. Après récupération des 3 extraits dans un ballon de 100 ml et mise au trait avec de l'acétate d'ammonium, le contenu des ballons a été filtré sur un filtre de type MN 619 eh ¼. Un blanc a été réalisé avec 100ml d'acétate d'ammonium filtrés sur MN 619 eh ¼. 100 µL de HNO<sub>3</sub> 7M ont été rajoutés dans chaque extrait filtré. Les extraits ont été conservés au frigo en attendant la détermination des bases échangeables.

Ensuite, le culot de terre a servi pour l'analyse de la CEC. Pour enlever l'excès d'acétate d'ammonium présent dans le culot de terre, 25 ml de Disolol® ont été ajoutés à la terre, le tout a été agité pendant 10 minutes puis centrifugé 10 minutes à 3000 T et le surnageant a été jeté. 25 ml de Disolol® ont été ajoutés au culot. Le tout a été mélangé énergiquement puis centrifugé 10 minutes à 3000 T et le surnageant a été jeté. Cette dernière opération a été répétée encore 2 fois. Le culot a été récupéré avec un peu d'eau dans un ballon de 200 ml puis 50 ml de NaOH 50% ont été ajoutés. La solution a été mélangée puis de l'eau a été ajoutée jusqu'à la base du col. Le lendemain, les solutions ont été mélangées après mise au trait puis laissées décantées une demi-journée. 10 ml de chaque solution ont été distillés dans 25 ml de H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> à 4 % durant 2 minutes et 30 secondes. 5 gouttes d'indicateur Tashiro (mélange à parts égales de bleu de méthylène et de rouge de méthyle) ont été ajoutées à la solution d'acide borique qui a ensuite a été titrée avec du HCl 0,1N (Titrisol).

La CEC, exprimée en méq/100g de sol, est calculée selon la formule suivante :

$$CEC = VHCl * 0,1(méq) * \frac{V_{firole}}{V_{sol}} * \frac{100g}{msol}$$

Où

VHCl est le volume d'HCl 0,1N ajouté lors du titrage en ml.

Vfirole est le volume de la fiole en ml, soit 200 ml.

Vsol est le volume de solution distillé en ml, soit 10 ml.

$m_{sol}$  est la masse de sol analysée en g, soit 5g.

Les teneurs en bases échangeables Ca, Mg, K et Na ont été mesurées par spectroscopie d'absorption atomique. Les droites d'étalonnage pour chaque élément se trouvent dans les annexes.

Le pourcentage de saturation en bases (SB) a été calculé comme suit :

$$SB = \frac{\text{somme des bases échangeables} \left( \frac{\text{még}}{100g} \right)}{CEC \left( \frac{\text{még}}{100g} \right)} * 100$$

#### 4.8.2 Caractéristiques physiques du sol

##### 4.8.2.1 Teneur en eau du sol

15 capteurs de teneur en eau du sol ECH<sub>2</sub>O 10HS ont été installés au centre des buttes n°2 à raison d'un capteur par butte. Les capteurs ont tous été insérés dans les 10 premiers cm du sol des buttes. Les capteurs ont été branchés à des dataloggers de type Em50 et ZL6. Les données de teneur en eau ont été enregistrées toutes les heures du 30 avril 2021 à 20h au 28 juin 2021 à 14h.

Les capteurs ont été étalonnés en laboratoire suivant le protocole en Annexe 9.

##### 4.8.2.2 Eau disponible pour les plantes, densité apparente sèche et porosité totale

Les courbes de rétention en eau de cinq buttes de types différents ont été construites pour chacun de leurs horizons respectifs. Ces données ont été utilisées pour estimer la quantité d'eau disponible pour les plantes dans les différentes buttes échantillonnées. L'objectif était aussi de tester la méthode de prélèvement en structure conservée sur les buttes.

##### 4.8.2.2.1 Échantillonnage

L'échantillonnage a été fait le 15 avril sur les buttes L1, H1, M1, J1, et N1. Pour chaque butte, un prélèvement par couche a été réalisé. Pour chaque prélèvement en structure conservée, un anneau volumétrique de 100 cm<sup>3</sup> a été déposé sur le sol. L'anneau a été enfoncé dans le sol en martelant sur le guide posé dessus. Le sol entourant l'anneau a été écarté, comme illustré sur la Figure 10, puis l'anneau a été extrait en coupant le sol à environ 2 cm sous l'anneau à l'aide d'une truelle. Une fois l'échantillon extrait, le surplus de sol entourant l'anneau a été retiré et chaque base de l'anneau a été amincie au couteau pour qu'il reste environ ½ cm de terre qui dépasse. Des couvercles ont été placés en-dessous et au-dessus de chaque anneau puis maintenus à l'aide d'élastiques. Chaque échantillon a été mis au volume de l'anneau en laboratoire.



*Figure 10 : Illustration du prélèvement en structure conservée sur le témoin L1.*

#### 4.8.2.2.2 Mesures de rétention d'eau

La courbe de rétention en eau de chaque échantillon prélevé en structure conservée a été construite. Pour ce faire, la teneur en eau du sol à des pressions de 0, 10, 40, 70, 100, 300, 700, 1000, 5000 et



15000 hPa a été mesurée au laboratoire de physique des sols de la faculté selon la procédure proposée par Stéphane Becquevort et Aurore Degré décrite dans l'Annexe 10.

#### 4.8.2.2.3 Calcul de la disponibilité en eau pour les plantes

L'eau disponible pour les plantes (PAW), exprimée en  $\text{m}^3/\text{m}^3$  a été calculée comme suit pour chaque couche des buttes échantillonnées :

$$PAW = \theta_{fc} - \theta_{pwp}$$

Où

$\theta_{fc}$  est la teneur en eau à la capacité au champ exprimée en  $\text{m}^3/\text{m}^3$ . Dans ce travail, l' $\theta_{fc}$  a été déterminée grâce au suivi temporel de la teneur en eau dans les 10 premiers centimètres du sol des buttes. Sur le graphique de la teneur en eau du sol de chaque butte en fonction du temps (**Error! Reference source not found.**) une période correspondant à l'équilibre après une pluie puis ressuyage a été identifiée et la teneur en eau moyenne pour chaque type de butte à ce moment-là a été considérée comme la  $\theta_{fc}$  pour la couche 0-10 cm. La  $\theta_{fc}$  pour les couches de nature différente et plus profondes n'a pas pu être déterminée ni au laboratoire par manque de temps, ni graphiquement. Malgré cela, le potentiel correspondant à la  $\theta_{fc}$  pour la couche 0-10 cm lu sur la courbe de rétention en eau a été utilisé pour déterminer les  $\theta_{fc}$  des autres couches de la butte.

$\theta_{pwp}$  est la teneur en eau au point de flétrissement permanent exprimée en  $\text{m}^3/\text{m}^3$ , ici considéré à -15330 cm (= -15000 hPa) (Radcliffe et al., 2010).

(Radcliffe et al., 2010)

Par butte, l'eau disponible pour les plantes calculée pour chaque couche a été multipliée par l'épaisseur (en cm) de chaque couche. L'eau disponible pour les plantes, exprimée en cm pour chaque couche, a ensuite été sommée sur une profondeur de 35 cm, donnant ainsi une estimation pour chaque type de butte de la hauteur d'eau disponible pour les plantes sur une profondeur de 35 cm.

#### 4.8.2.2.4 Densité apparente sèche

Les échantillons en structure conservée prélevés pour l'élaboration des courbes de rétention en eau ont été pesés secs après passage à l'étuve à 105°C pour les échantillons de terre et à 60°C pour les échantillons de MO. La densité apparente sèche ( $\delta$ ) exprimée en  $\text{g}/\text{cm}^3$  a été déterminée comme suit :

$$\delta = \frac{\text{Méchantillon sec}}{\text{Vanneau}}$$

Où *Méchantillon sec* est la masse de l'échantillon sec, en g et *Vanneau* est le volume de sol extrait, soit  $100 \text{ cm}^3$ .

(Radcliffe et al., 2010)

#### 4.8.2.2.5 Porosité totale

Pour ces mêmes échantillons, la porosité totale ( $P$ ) pour un poids spécifique réel pris égal à  $2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$ , exprimée en %, a été calculée comme suit :

$$P = \left(1 - \frac{\delta}{2,65}\right) * 100$$

Où  $\delta$  est la densité apparente de l'échantillon.

(Radcliffe et al., 2010)

#### 4.8.2.3 Température du sol

La température du sol des buttes à 12 cm de profondeur a été relevée les 24 février, 5 mars et 13 mai 2021 à l'aide du thermomètre Traceable® de VWR. La température a été prise à 9 endroits sur chaque butte. 3 mesures ont été faites sur le sommet de la butte, 3 sur le versant sud et 3 sur le versant nord.

#### 4.8.3 Caractéristiques biologiques du sol

##### 4.8.3.1 Comparaison de l'activité microbienne dans le sol des buttes

Le dosage par spectrophotométrie de l'hydrolyse du diacétate de fluorescéine (FDA) par les enzymes produites par les champignons et bactéries du sol a été utilisé pour comparer l'activité enzymatique des microorganismes du sol entre les différents types de buttes. Lors de son hydrolyse par des enzymes microbiennes impliquées dans la décomposition de la MO telles que les estérases, les protéases et les lipases (Schnürer et Rosswall, 1982 cité par Sánchez-Monedero *et al.*, 2008), le FDA incolore libère la fluorescéine, un produit coloré qui peut être mesuré par spectrophotométrie (Adam *et al.*, 2001).

##### 4.8.3.1.1 Échantillonnage

Le sol des buttes n°2 a été échantillonné le 21 mai. Pour chaque butte, les 10 premiers cm du sol ont été prélevés à 9 endroits sur la butte selon le schéma illustré en Figure 11 à l'aide d'une gouge de 3 cm de diamètre. Pour chaque butte, les 9 prélèvements ont été mélangés pour obtenir un échantillon composite. Les échantillons mis en sachet ont été conservés en chambre froide à 4°C pendant 4 jours.

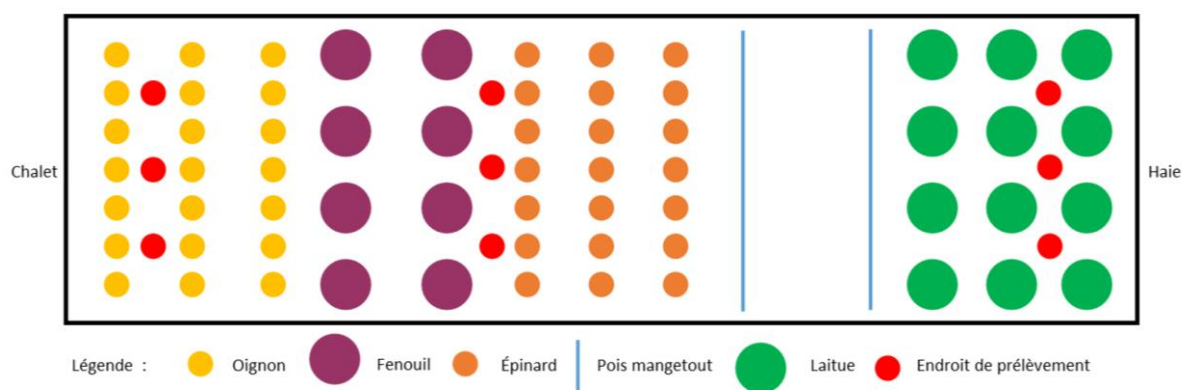


Figure 11 : Endroits de prélèvements de sol pour l'analyse de l'activité enzymatique dans le sol des buttes

##### 4.8.3.1.2 Méthode

L'hydrolyse du FDA a été déterminée en suivant le protocole établi par Sánchez-Monedero *et al.* (2008).

Les échantillons de sol ont été séchés à l'étuve à 40°C pendant 48h. Pour chaque échantillon, 3 répétitions ont été réalisées. 1 g de sol sec a été agité avec 200 µl de solution mère de FDA (2 mg/ml d'acétone) et 10 ml de tampon phosphate de potassium 0,06 M (à pH 7,6) pendant 1 h à environ 30°C. La réaction a été arrêtée en ajoutant 10 ml d'acétone. Les échantillons ont été centrifugés 3 minutes à 10000 xg. La solution surnageante a été prélevée et son absorbance a été mesurée à 490 nm. Un blanc sans terre et un témoin positif préparé avec une suspension bactérienne provenant d'une culture pure de lactobacilles sur agar, ont été réalisés.

Les données d'absorbance ont permis de faire une analyse comparative de l'activité microbienne dans les différents types de buttes.

#### 4.8.3.2 Détermination de la biomasse microbienne du sol

Pour chaque butte n°2, la biomasse microbienne du sol, c'est-à-dire « la masse de cellules microbiennes intactes dans un sol donné » (ISO 14240-2 : 1997) a été déterminée par la méthode fumigation-extraction, conformément à la norme ISO 14240-2 (1997).

##### 4.8.3.2.1 Échantillonnage

Le sol des buttes n°2 a été échantillonné le 18 juin. La teneur en eau moyenne des 10 premiers cm de sol au moment de l'échantillonnage était de  $0,239 \pm 0,006 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Pour chaque butte, les 10 premiers cm du sol ont été prélevés à 9 endroits sur la butte selon le schéma illustré en Figure 12 à l'aide d'une gouge de 3 cm de diamètre. Pour chaque butte, les 9 prélèvements ont été mélangés pour obtenir un échantillon composite. Les échantillons frais ont ensuite été tamisés à 8 mm puis mis en sachet et conservés en chambre froide à 4°C pendant 2 jours.

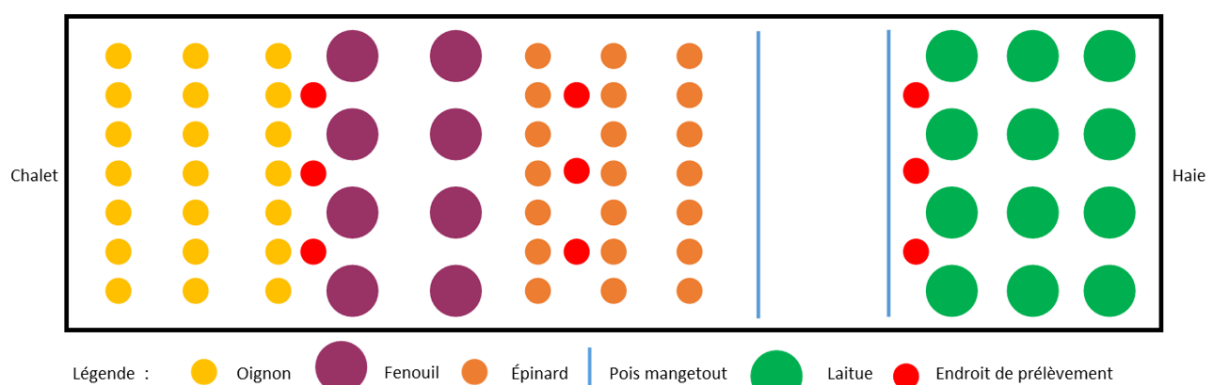


Figure 12 : Endroits de prélèvements de terre pour l'analyse du carbone microbien.

##### 4.8.3.2.2 Méthode

Pour chaque échantillon, trois fois 10 g de sol frais ont été pesés puis fumigés au chloroforme exempt d'éthanol pendant 24h et trois fois 10 g de sol frais ont été également pesés mais non fumigés. La fumigation provoque la lyse des cellules microbiennes intactes, libérant ainsi le carbone des cellules (ISO 14240-2 : 1997; Vincent et al., s. d.). Les échantillons fumigés et non fumigés ont été agités avec 40 ml de sulfate de potassium 0,5 M pendant 30 minutes afin d'extraire le CO.

Après filtration sur un filtre de type 595 1/2, 8 ml de chaque extrait a été bouilli doucement sous reflux avec 15 ml de mélange de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  et  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (2:1) et 2 ml de solution de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  0,0667 M (0,4 N) pendant 30 minutes. Pour chaque série, 6 blancs avec 8 ml de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  0,5 M (3 minéralisés et 3 non minéralisés) ont été réalisés. En présence d'un acide fort et à haute température, la MO est oxydée par le bichromate en excès (Giovanni et al., n.d.). Le Cr(VI) de couleur orange est réduit par la MO en Cr(III) de couleur verte (Giovanni et al., n.d.). Après refroidissement et l'ajout d'1 ml de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , l'excès de dichromate a été titré en retour au titrateur automatique (TitroLine® 5000) avec une solution de sel de Mohr 0,040 M.

Le CO extractible exprimé en  $\mu\text{g}/\text{ml}$  peut être calculé comme suit :

$$C_1 = \frac{(V_{\text{blanc reflué}} - V_{\text{échantillon}})}{V_{\text{blanc non reflué}}} \times [\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7] \times V_{\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7} \times E \times \frac{1000}{V_{\text{échantillon ajouté}}}$$

Où

$V_{\text{blanc reflué}}$  est le volume de solution de titrage consommé par l'essai à blanc reflué, en ml

$V_{\text{échantillon}}$  est le volume de solution de titrage consommé par l'échantillon, en ml

$V_{\text{blanc non reflué}}$  est le volume de solution de titrage consommé par l'essai à blanc non reflué, en ml

$[K_2Cr_2O_7]$  est la concentration de la solution de  $K_2Cr_2O_7$ , en N

$V_{K_2Cr_2O_7}$  est le volume de  $K_2Cr_2O_7$  ajouté en ml, soit 2 ml

$V_{\text{échantillon ajouté}}$  est le volume d'échantillon ajouté, soit 8 ml

$E = 3$  (conversion du CO  $C[C]$  en  $CO_2[C(+IV)]$ )

Le CO extractible exprimé en  $\mu\text{g/g}$  de sol peut être calculé comme suit :

$$C_2 = C_1 \times \frac{m_{\text{extractant}}}{m_{\text{échantillon}}}$$

Où

$m_{\text{extractant}}$  est la masse d'extractant, en g

n.b. : dans ce travail, il a été considéré que 40 ml de sulfate de potassium 0,5 M équivaut à 40g.

$m_{\text{échantillon}}$  est la masse de terre fraîche pesée initialement, soit 10g.

(ISO 14240-2 : 1997)

La différence entre la teneur en CO d'un sol fumigé et celle du même sol non-fumigé détermine le carbone microbien (Vincent et al., n.d.). Le carbone de la biomasse microbienne exprimé en  $\mu\text{g/g}$  de sol est calculé comme suit :

$$B_C = \frac{C_{2\text{sol fumigé}} - C_{2\text{sol non fumigé}}}{0.38}$$

Où

$C_{2\text{sol fumigé}}$  est le CO extractible des échantillons fumigés, en  $\mu\text{g/g}$  de sol sec

$C_{2\text{sol non fumigé}}$  est le CO extractible des échantillons non fumigés, en  $\mu\text{g/g}$  de sol sec.

(ISO 14240-2 : 1997)

## 4.9 ANALYSES STATISTIQUES

Les analyses statistiques des données ont été réalisées sur le logiciel RStudio®. Pour chaque variable mesurée, une ANOVA à un facteur fixe « Type de butte » et à un facteur aléatoire « Bloc » a été réalisée à l'aide de la fonction R `aov()` afin de voir s'il existe ou non une différence significative entre les différents types de buttes. Les conditions d'application ont été vérifiées avec les tests de Bartlett ( $H_0$  : égalité des variances) et Shapiro-Wilk ( $H_0$  : normalité des résidus de l'ANOVA). Lorsque les conditions d'application n'étaient pas respectées ( $p$ -valeur  $< 0,05$ ), une ANOVA utilisant des tests de permutation a été réalisée avec la fonction R `aovp()`. Les résultats de l'aov et de l'aovp ont été comparés entre eux. Lorsque l'ANOVA indiquait des différences significatives, les moyennes marginales de la variable étudiée pour chaque modalité du facteur « Type de butte » ont été estimées à l'aide de la fonction `emmeans()` puis comparées entre elles par paires à l'aide de la fonction `pwpp()`. La fonction R `cld()` a été utilisée pour afficher les lettres de toutes les comparaisons par paires de moyennes marginales estimées.

Pour l'analyse de la teneur en eau, un modèle linéaire à effets mixtes a été ajusté aux données via la fonction R `lmer()`, avec le type de butte en facteur fixe et la date et la butte en facteurs aléatoires. Une

analyse de la variance (test de type II Wald chisquare) a été réalisée sur le modèle grâce à la fonction *Anova()*.

Pour l'analyse statistique du nombre de nodosités, une ANOVA à deux facteurs fixes « Type de butte » et « Mélange » et à un facteur aléatoire « Bloc » a été réalisée à l'aide de la fonction R *aov()* afin de voir s'il existe ou non une différence significative entre les différents types de buttes. Comme il y avait une interaction significative entre les facteurs « Type de butte » et « Mélange », le jeu de données a été séparé en fonction du facteur « Mélange » puis une ANOVA à un facteur « Type de butte » a été réalisée sur chacun des jeux de données. Les conditions d'application ont été vérifiées avec les tests de Bartlett ( $H_0$  : égalité des variances) et Shapiro-Wilk ( $H_0$  : normalité des résidus de l'ANOVA).



## 5 RÉSULTATS

---

### 5.1 OBSERVATIONS PERSONNELLES

La culture de pois a été ravagée par des pigeons ramiers dès les premiers stades de développement des pois jusqu'à la récolte. Les fenouils sont tous montés en graine sur la butte M3. Dans le sol de la butte en lasagne M3, la dernière construite, la température est montée à 35°C à 10 cm de profondeur. Les fenouils sur les buttes sandwich présentaient un feuillage à l'aspect vert pâle et des plants peu vigoureux (Figure 25). Les épinards présentaient sur les buttes sandwich des feuilles jaunes et des feuilles mortes (Figure 13). Les laitues sur les buttes sandwich n'ont pas pommé, les feuilles sont restées petites et ont pris une teinte vert jaunâtre (Figure 20). Les feuilles des oignons tiges plantés sur les buttes sandwich étaient plus pâles (Figure 22). Les premières buttes en lasagne, construites l'année dernière, ont perdu en volume depuis leur construction, elles se sont affaissées et aplaties. Le versant sud de la butte semblait produire plus de biomasse que le versant nord de la butte.



Figure 13 : Épinards sur une butte sandwich.

## 5.2 SUIVI DE LA CULTURE DE POIS

### 5.2.1 Levées et stades de développement des pois mangetout de Grace®

L'analyse statistique des levées des pois n'a pas montré de différences significatives entre les différents types de buttes (p-valeur > 0,05).

L'analyse statistique des stades des pois du 23 avril et du 6 mai révèle des différences très hautement significatives entre les différents types de butte. Aux deux dates, les pois sur les buttes forestières sont significativement plus avancés dans leur développement que sur tous les autres types de buttes (Tableau 3). Toujours aux deux dates, les buttes en lasagne, les buttes sandwich et les témoins ne montrent pas de différence significative entre elles. Le 6 mai, les pois sur les buttes en terre sont significativement moins avancés dans leur développement que sur les buttes en lasagne et les buttes sandwich, alors qu'au 23 avril les buttes en terre ne montraient aucune différence avec ces buttes (Tableau 3). Aux deux dates, les témoins et les buttes en terre ne diffèrent pas significativement.

Tableau 3 : Stades phénologiques moyens des pois selon l'échelle BBCH pour les différents types de buttes les 23 avril et 6 mai 2021. Les moyennes avec des lettres différentes sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).

	Stades phénologiques moyens des pois selon l'échelle BBCH	
	23 avril 2021	6 mai 2021
Buttes forestières	12,74 ± 1,07 <sup>b</sup>	14,15 ± 1,35 <sup>c</sup>
Buttes sandwich	12,06 ± 1,18 <sup>a</sup>	13,56 ± 1,42 <sup>b</sup>
Buttes en lasagne	12,22 ± 0,96 <sup>a</sup>	13,50 ± 1,25 <sup>b</sup>
Témoins	11,91 ± 0,84 <sup>a</sup>	13,30 ± 1,17 <sup>ab</sup>
Buttes en terre	11,90 ± 0,86 <sup>a</sup>	12,85 ± 2,67 <sup>a</sup>

### 5.2.2 Nodosités et mycorhizes dans les racines de pois

L'analyse statistique du nombre de nodosités sur les racines de pois n'a pas montré de différences significatives entre les types de buttes. Les buttes forestières ont un nombre moyen de nodosités inférieur aux autres types de buttes (Figure 14).

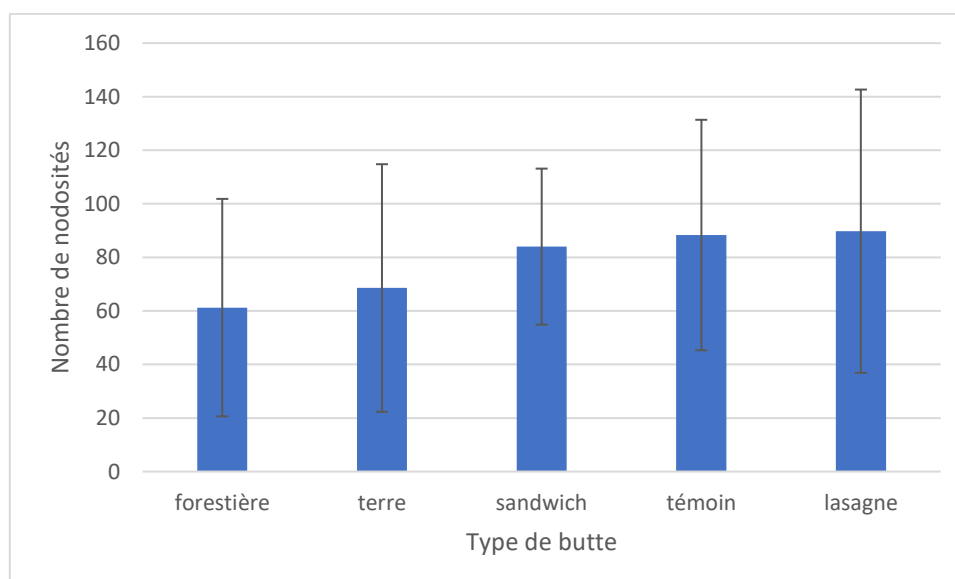


Figure 14 : Nombre moyen de nodosités sur les racines de pois selon le type de butte. Les barres verticales correspondent aux écarts-types.

La coloration des CMA dans les racines de pois a bien fonctionné et des arbuscules ont été observés au microscope (Figure 15). D'après les premières observations, il ne semble pas y avoir de différence de fréquence des mycorhizes, d'intensité de la colonisation mycorhizienne et d'abondance d'arbuscules dans le système racinaire des pois entre les buttes sandwich et les témoins.

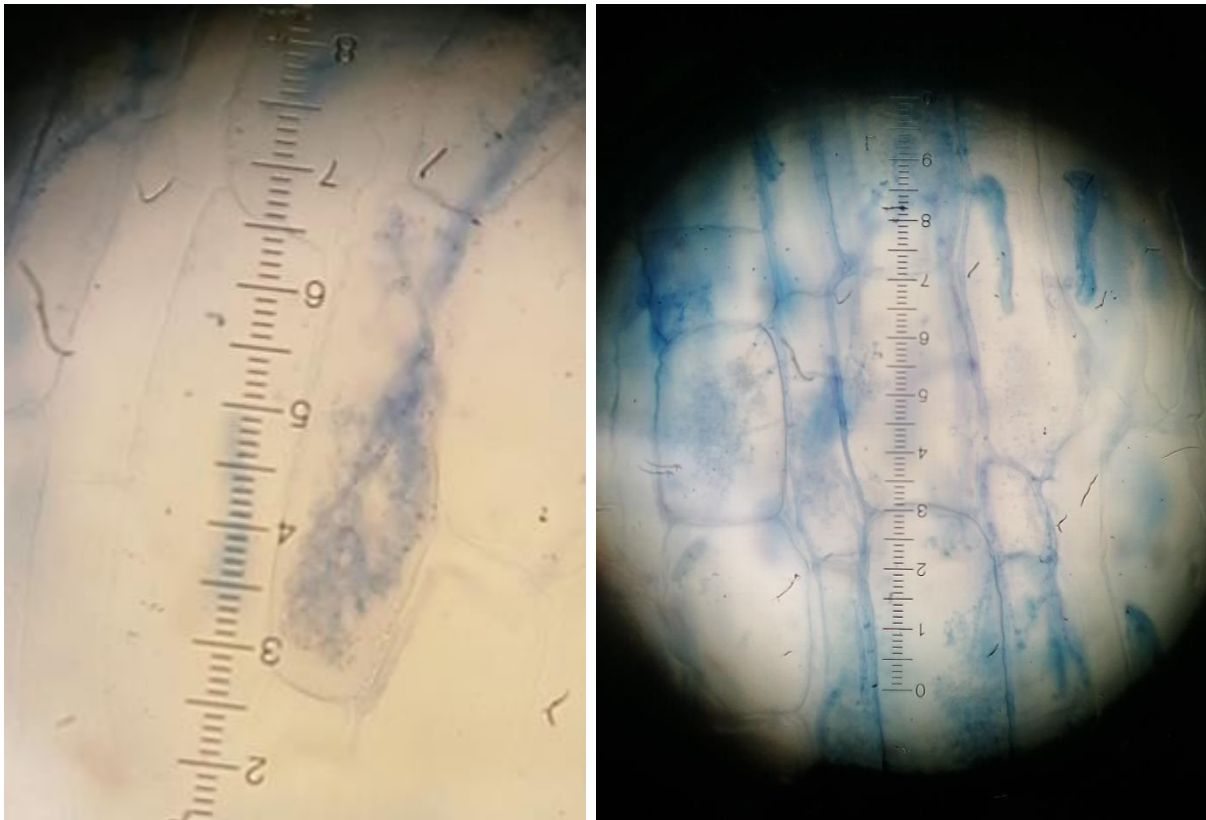


Figure 15 : Arbuscules de CMA dans les cellules des racines de pois observées au microscope.

### 5.3 QUANTIFICATION DE LA BIOMASSE AÉRIENNE

#### 5.3.1 Épinards

##### 5.3.1.1 Hauteur des plants

L'analyse statistique de la hauteur des épinards à la récolte révèle des différences très hautement significatives entre les différents types de butte ( $p$ -valeur  $< 0,001$ ) (Figure 16). La hauteur des épinards sur les buttes forestières est en moyenne 1,5 fois plus élevée que sur les témoins. Les témoins montrent une hauteur moyenne 1,5 fois supérieure à celle des buttes sandwich. Les tendances révélées par l'analyse statistique sont illustrées sur la Figure 17.

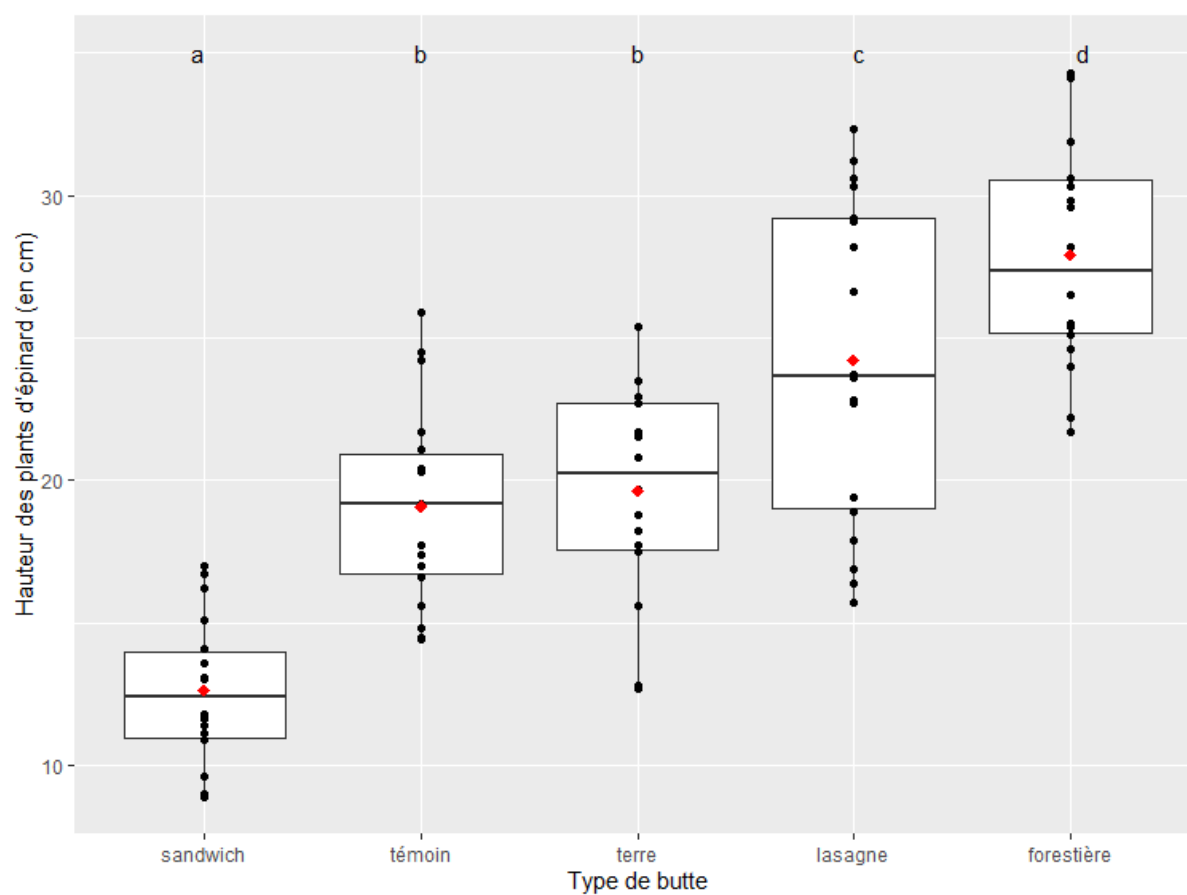


Figure 16 : Hauteur des plants d'épinard (en cm) selon le type de butte. La taille moyenne pour chaque type de butte est représentée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).





Figure 17 : Comparaison visuelle de la taille des épinards à la récolte selon le type de butte. De gauche à droite et de haut en bas : butte sandwich O2, témoin L2, butte en terre I2, butte en lasagne M2, butte forestière J2.

#### 5.3.1.2 Biomasse sèche

L'analyse statistique de la biomasse sèche des épinards révèle une différence significative ( $p$ -valeur = 0,0166) entre la butte sandwich et la butte forestière, comme illustré sur la Figure 18. La biomasse sèche des épinards sur les buttes forestières est en moyenne presque 2 fois plus élevée que sur les témoins. Les témoins montrent une biomasse sèche moyenne 1,8 fois supérieure à celle des buttes sandwich. L'analyse statistique des biomasses fraîches révèle les mêmes tendances.

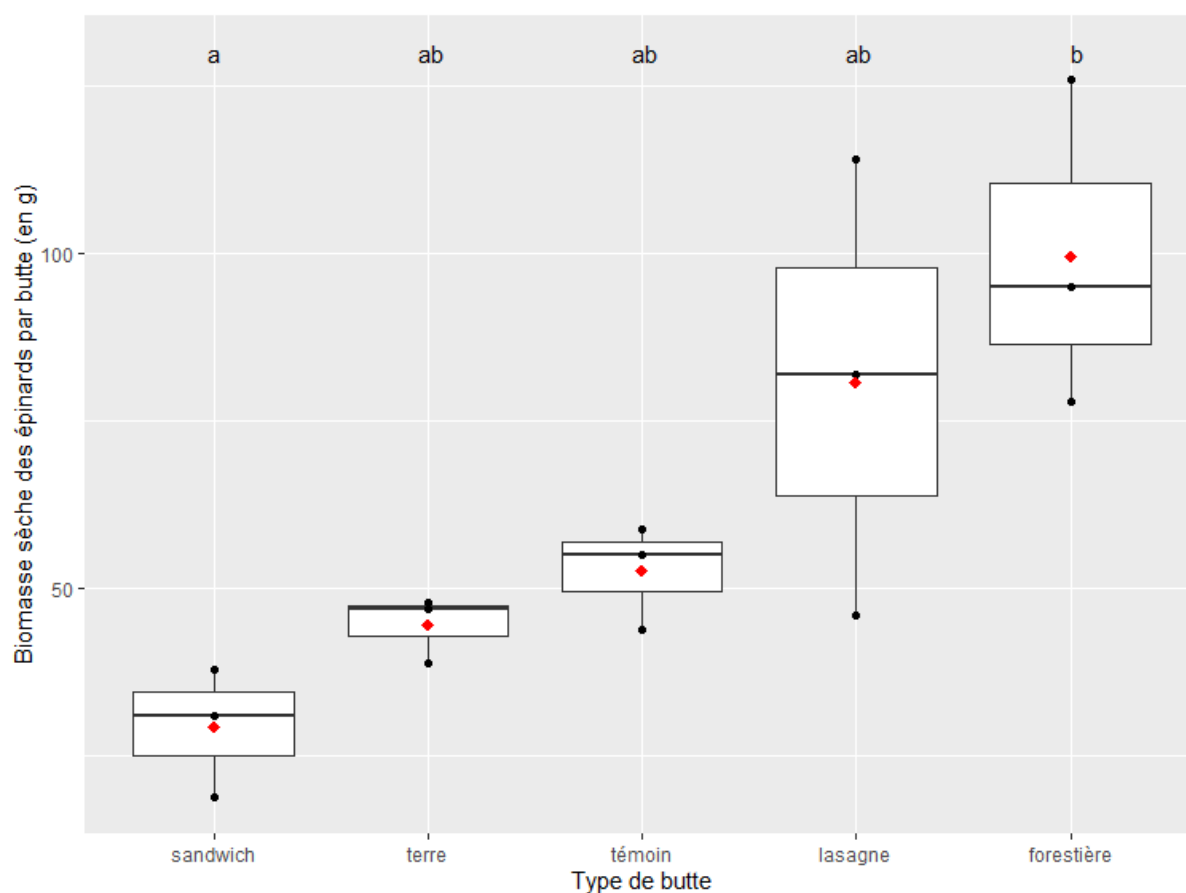


Figure 18 : Biomasse sèche des épinards (en g) en fonction du type de butte. La biomasse sèche moyenne pour chaque type de butte est indiquée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).

### 5.3.2 Laitues

L'analyse statistique de la biomasse sèche des laitues révèle des différences très hautement significatives ( $p$ -valeur  $< 0,001$ ) entre les différents types de buttes (Figure 19). Les buttes forestières produisent des laitues dont la biomasse sèche moyenne est deux fois plus élevée que celle des témoins. Les témoins produisent des laitues dont la biomasse sèche moyenne est 1,7 fois supérieure à celle des buttes sandwich. L'analyse statistique des biomasses fraîches des laitues révèle les mêmes tendances. Ces tendances étaient visibles par simple observation des buttes (Figure 20).

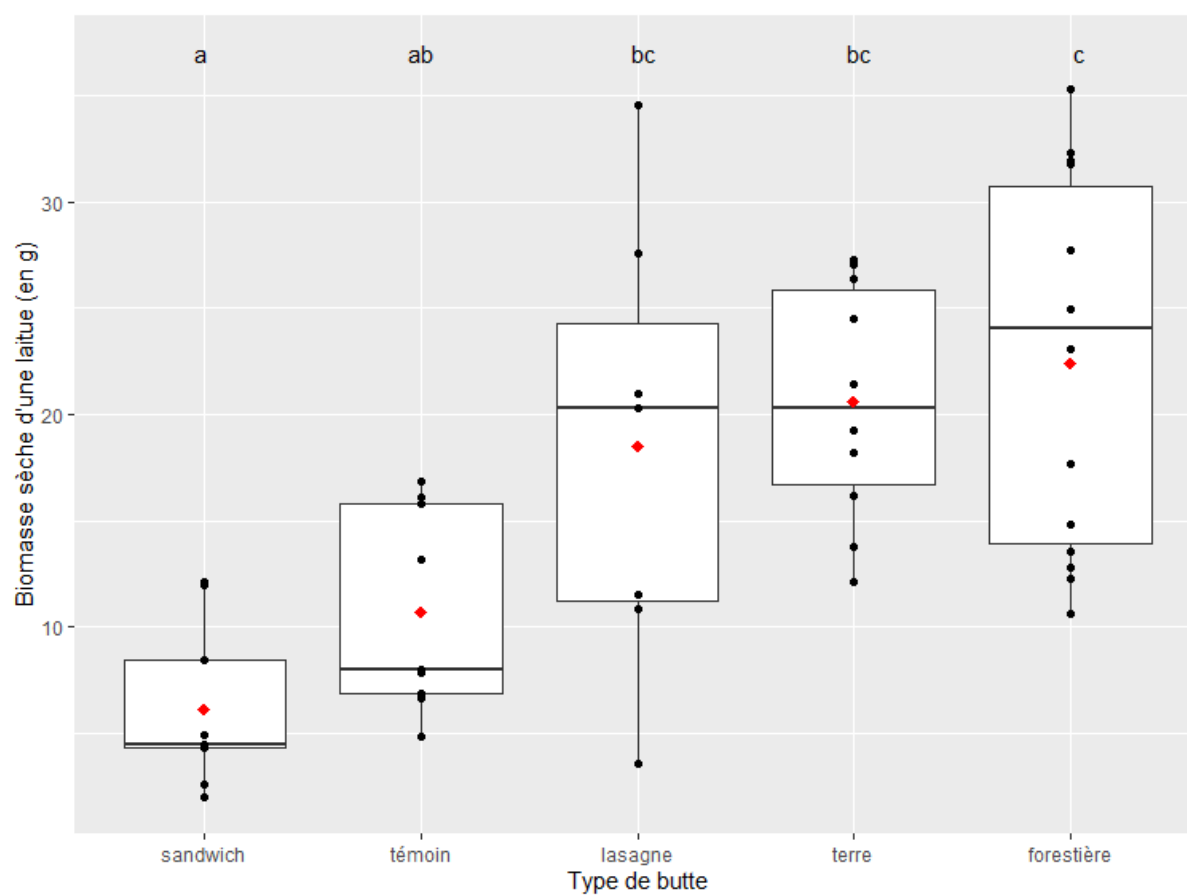


Figure 19 : Biomasse sèche (en g) des laitues en fonction du type de butte. La biomasse sèche moyenne pour chaque type de butte est indiquée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).





Figure 20 : Observation visuelle des laitues avant la récolte. De gauche à droite et de haut en bas : butte sandwich, témoin, butte en lasagne, butte en terre, butte forestière.

### 5.3.3 Pois mangetout

L'analyse statistique de la biomasse sèche des gousses de pois n'a pas mis en évidence de différence significative entre les différents types de buttes.

### 5.3.4 Oignons tiges

#### 5.3.4.1 Hauteur des plants

L'analyse statistique de la hauteur des oignons tiges a révélé des différences très hautement significatives ( $p\text{-valeur} < 0,001$ ) entre les différents types de buttes (Figure 21). Les résultats de l'analyse statistique rejoignent les observations visuelles faites a priori (Figure 22). La hauteur des oignons tiges sur les buttes forestières est en moyenne 1,2 fois plus élevée que sur les témoins. Les témoins montrent une hauteur moyenne 1,5 fois supérieure à celle des buttes sandwich.



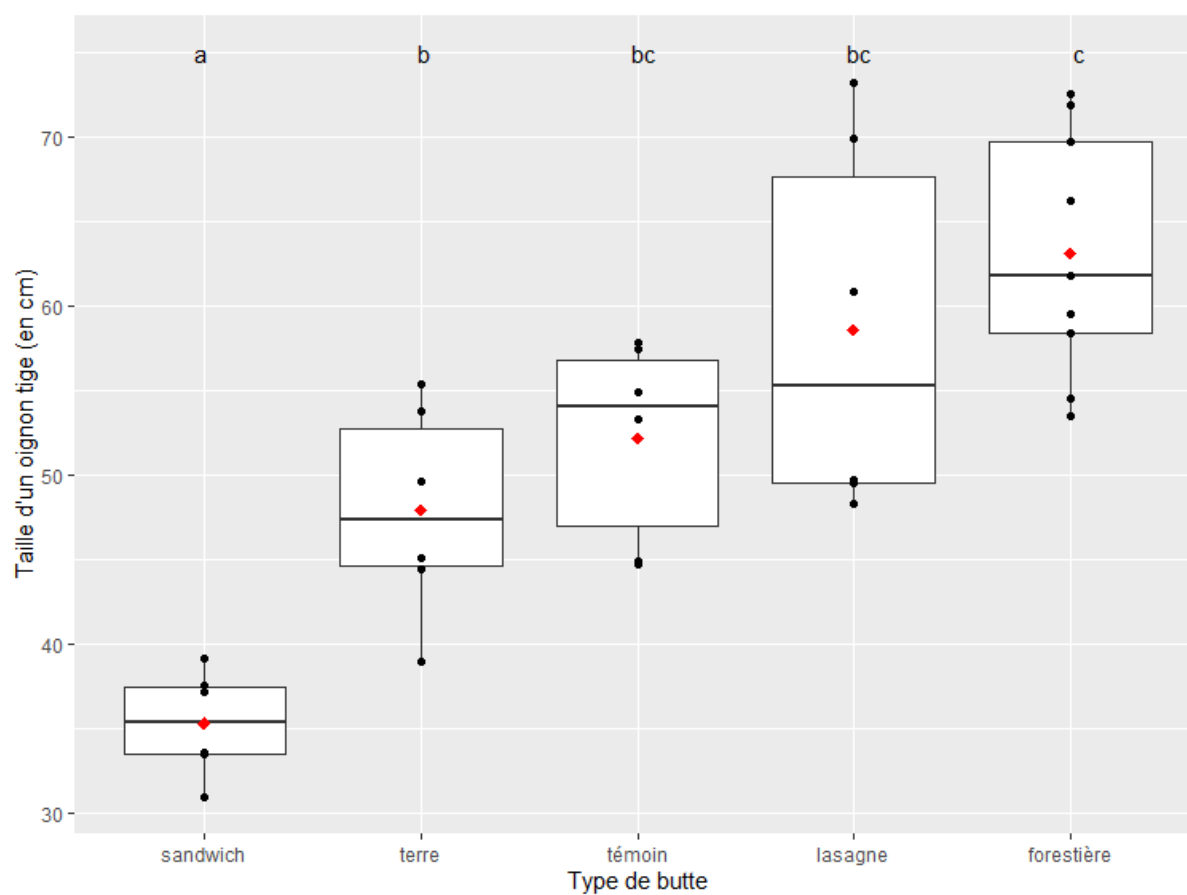


Figure 21 : Taille des oignons à la récolte par type de butte. La taille moyenne pour chaque type de butte est indiquée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).



Figure 22 : Comparaison visuelle de la taille des oignons tiges à la récolte selon le type de butte.

#### 5.3.4.2 Biomasse fraîche

L'analyse statistique de la biomasse fraîche des oignons tiges révèle des différences très hautement significatives ( $p$ -valeur  $< 0,001$ ) entre les différents types de butte (Figure 23). La biomasse fraîche des oignons tiges sur les buttes forestières est en moyenne 2,2 fois plus élevée que sur les témoins. Les témoins montrent une biomasse fraîche moyenne 1,5 fois supérieure à celle des buttes sandwich.

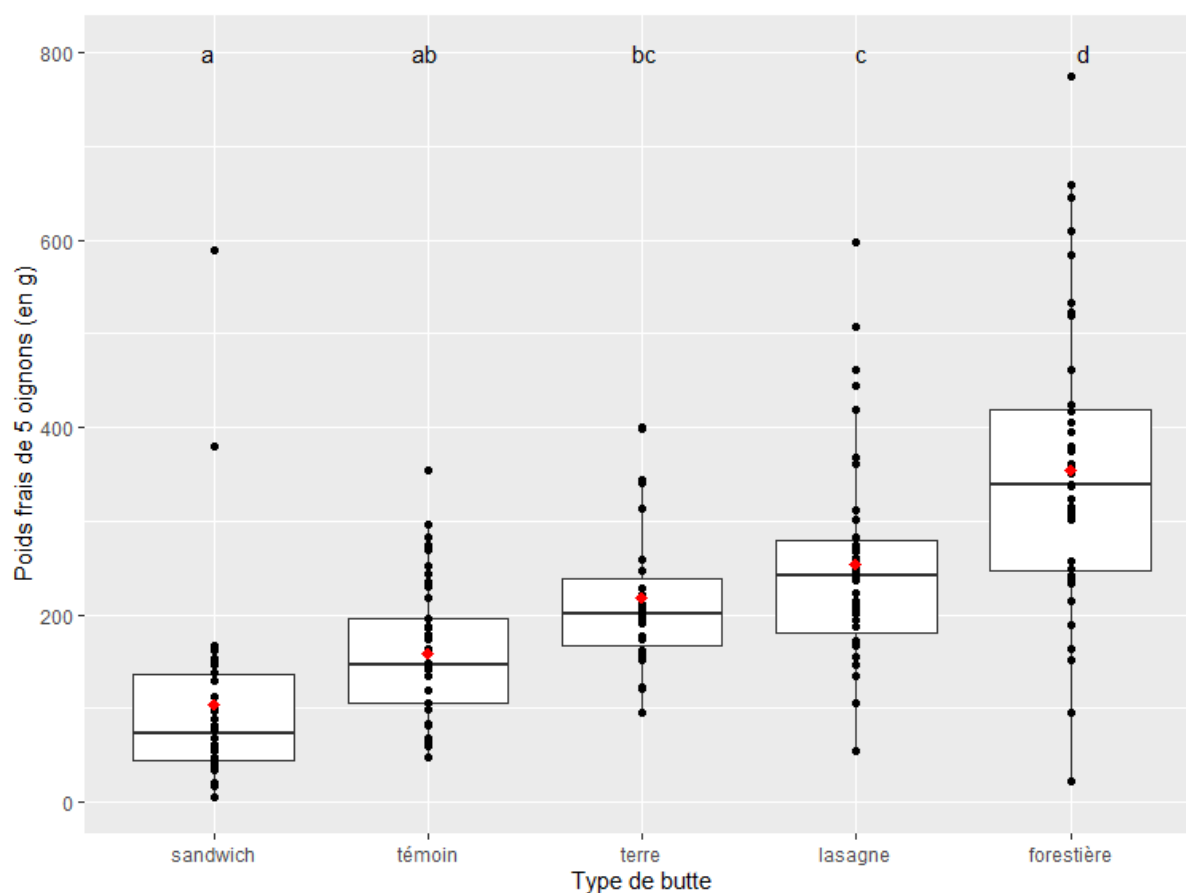


Figure 23 : Biomasse fraîche des oignons tiges par bottes de 5 (en g) en fonction du type de butte. La biomasse fraîche moyenne des oignons par type de butte est indiquée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).

### 5.3.5 Fenouils

L'analyse statistique de la biomasse fraîche des fenouils révèle des différences très hautement significatives ( $p$ -valeur  $< 0,001$ ) entre les différents types de butte (Figure 24). La biomasse fraîche des fenouils sur les buttes forestières est en moyenne 1,6 fois plus élevée que sur les témoins. Les témoins montrent une biomasse fraîche moyenne 1,4 fois supérieure à celle des buttes sandwich. Les résultats de l'analyse statistique rejoignent les observations visuelles faites a priori (Figure 25).

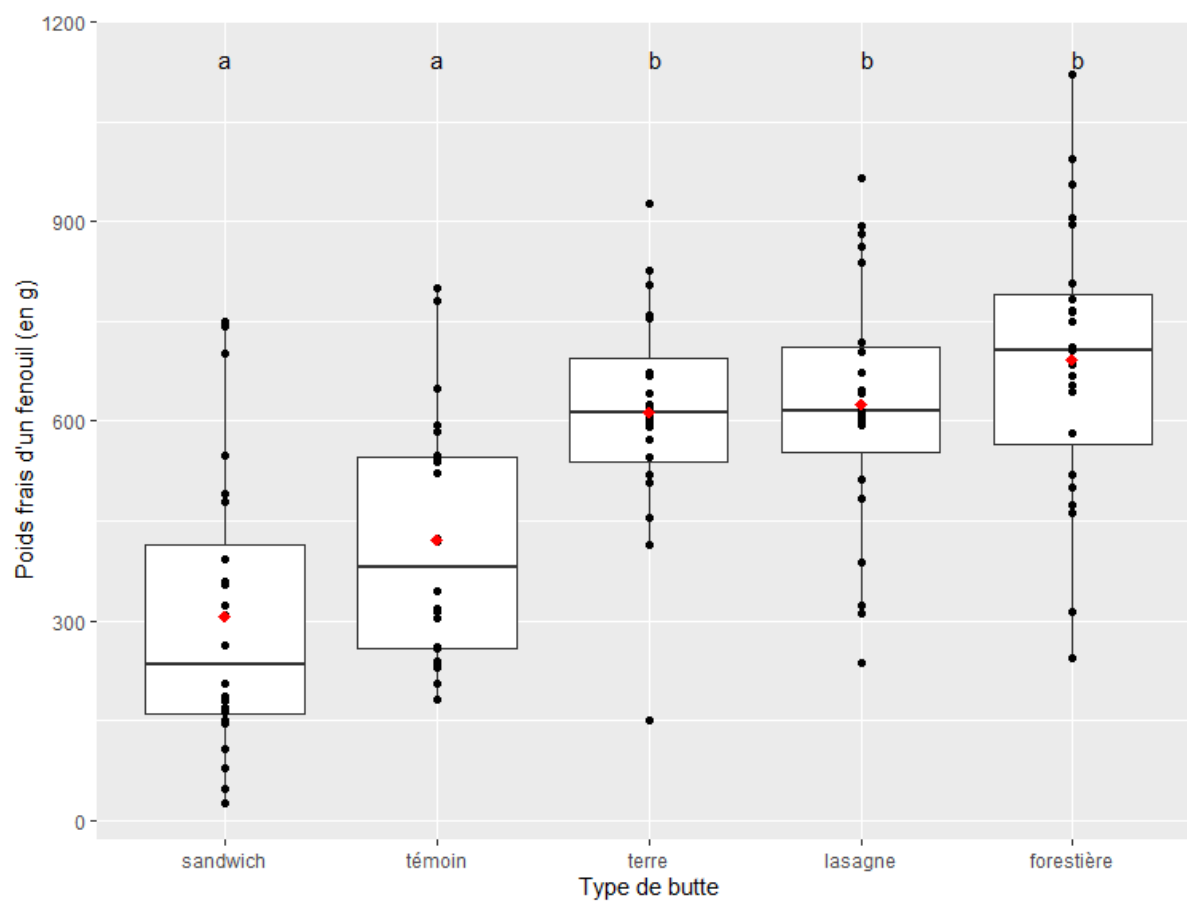


Figure 24 : Biomasse fraîche des fenouils (en g) en fonction du type de butte. La biomasse fraîche moyenne par type de butte est indiquée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).

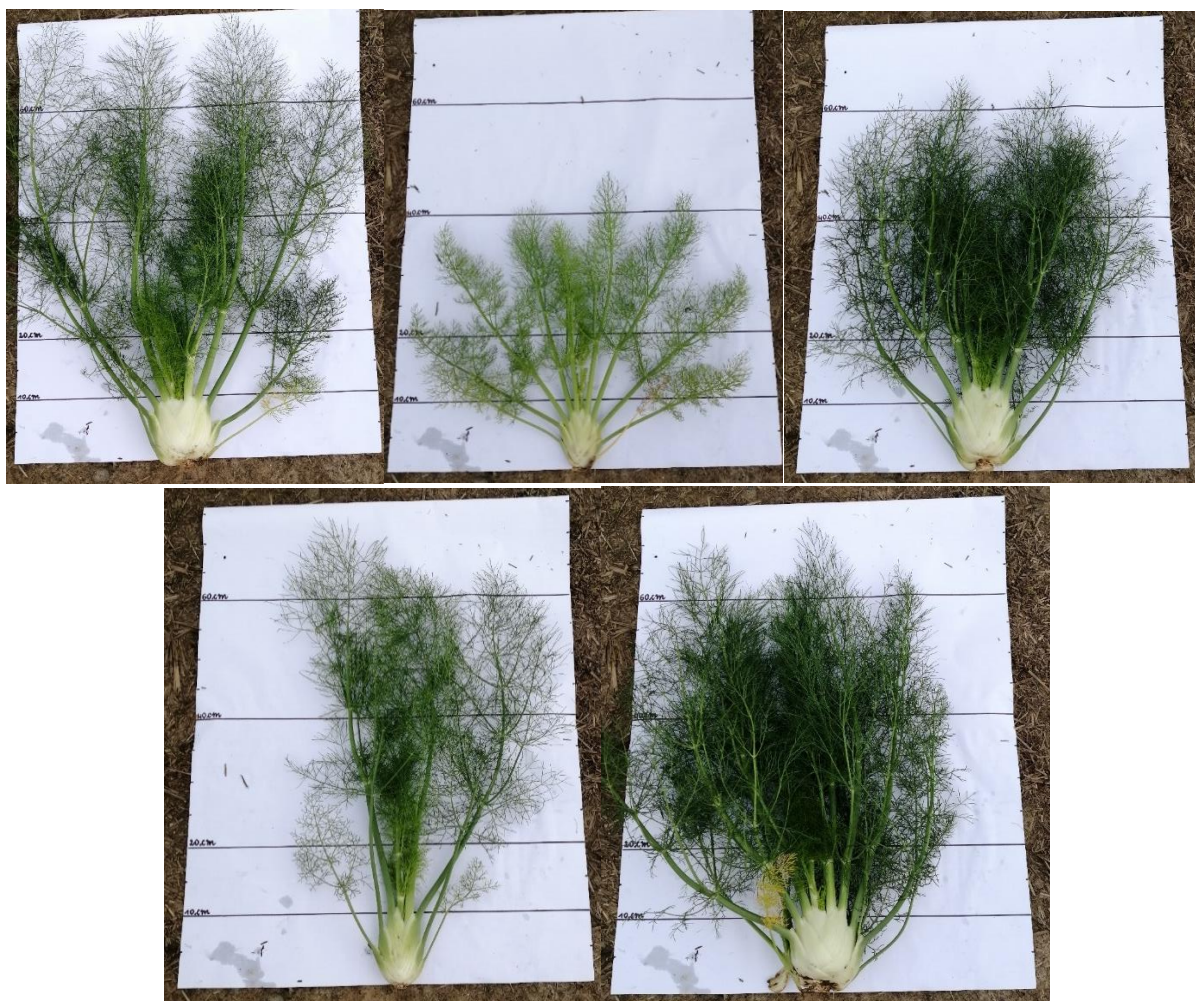


Figure 25 : Comparaison visuelle des fenouils selon le type de butte. De gauche à droite et de haut en bas : butte en lasagne D2, butte sandwich F2, butte forestière J2, témoin K2, butte en terre N2. Sur la feuille blanche, le 1<sup>er</sup> trait en partant du bas indique 10 cm, le 2<sup>ème</sup> trait indique 20 cm, le 3<sup>ème</sup> 40 cm et le 4<sup>ème</sup> 60 cm.

## 5.4 ANALYSES DU (TECHNO)SOL

### 5.4.1 Caractéristiques chimiques du sol

Les résultats de l'analyse chimique du sol des buttes réalisées par le laboratoire d'analyses agricoles à La Hulpe sont repris dans le Tableau 4 et le Tableau 5. Les résultats des analyses de la CEC, des bases échangeables et du taux de saturation sont repris dans le Tableau 6. Étant donné le manque de répétition, aucune analyse statistique n'a été réalisée. Cependant, quelques tendances peuvent être observées. Le COT et l'N total semblent supérieurs dans les buttes contenant de la MO par rapport aux buttes en terre et aux témoins. Le pourcentage de saturation en bases ne semble pas différent d'une modalité à l'autre et le complexe d'échange semble principalement saturé en  $\text{Ca}^{2+}$ . Les concentrations en éléments biodisponibles sont supérieures aux zones de références<sup>1</sup> dans toutes les modalités. Dans l'ensemble, le sol des buttes est plutôt riche.

<sup>1</sup> Les zones de référence utilisées par le laboratoire d'analyses agricoles à La Hulpe sont basées sur des essais effectués dans le cadre de la Commission des Sols de Wallonie par Ir A. Descamps. (Essais non publiés)

Selon Genot et al. (2007), le sol des buttes et des témoins ont des concentrations en Ca, Mg et K échangeables « élevées » à « très élevées ». Le complexe d'échange est saturé à 100 % par les bases pour toutes les buttes sauf les buttes en lasagne n°2.

Le laboratoire de La Hulpe recommande d'appliquer du sulfate d'ammoniaque à 20% sur les buttes en terre n°2 et les témoins n°2 qui ont une teneur un peu plus faible en N. Le rapport K/Mg étant déséquilibré (valeur de 4) pour les buttes forestières n°1, le laboratoire de La Hulpe recommande d'y appliquer de la kiésérite pour lever le risque de carence induite en magnésium.

Tableau 4 : Concentrations en COT, N total et rapport C/N des buttes n°1 et n°2. Les zones de référence sont basées sur des essais effectués dans le cadre de la Commission des Sols de Wallonie par Ir A. Descamps. (Essais non publiés)

	COT g/kg	Humus %	N total %	C/N
<b>Zone de référence</b>				<b>8 - 12</b>
Buttes forestières n°1	48	9,6	0,38	13
Buttes en lasagne n°1	52	10,4	0,33	16
Buttes sandwich n°1	46	9,3	0,34	14
Témoins n°1	42	8,4	0,23	18
Buttes en terre n°1	39	7,7	0,23	17
Buttes forestières n°2	62	12,5	0,37	17
Buttes en lasagne n°2	46	9,2	0,31	15
Buttes sandwich n°2	44	8,8	0,30	15
Témoins n°2	30	6,1	0,18	17
Buttes en terre n°2	28	5,5	0,21	13

Tableau 5 : pH<sub>KCl</sub> et teneurs en éléments biodisponibles des buttes n°1 et n°2. Les zones de référence sont basées sur des essais effectués dans le cadre de la Commission des Sols de Wallonie par Ir A. Descamps. (Essais non publiés)

	pH <sub>KCl</sub>	P mg/100g	K mg/100g	Mg mg/100g	Ca mg/100g
<b>Zone de référence</b>	<b>6,6</b>	<b>4,6 - 7,5</b>	<b>14 - 21</b>	<b>7 - 10</b>	
Buttes forestières n°1	6,8	25,9	92	26	370
Buttes en lasagne n°1	6,7	28,1	76	26	474
Buttes sandwich n°1	7,0	26,1	67	27	429
Témoins n°1	7,1	22,7	50	23	500
Buttes en terre n°1	7,2	22,8	47	21	491
Buttes forestières n°2	7,0	25,2	62	29	463
Buttes en lasagne n°2	6,7	20	59	24	346
Buttes sandwich n°2	6,7	18,0	51	22	309
Témoins n°2	7,1	17	42	19	382
Buttes en terre n°2	6,7	12,9	43	18	321

Tableau 6 : CEC, bases échangeables et taux de saturation en bases du complexe d'échange (SB)

	CEC méq/100g	Bases échangeables (méq/100g)				SB %
		Ca	Mg	K	Na	
Buttes forestières n°1	19,2	14,6	2,3	2,6	0,2	103
Buttes en lasagne n°1	17,6	17,6	2,3	2,0	0,2	126
Buttes sandwich n°1	16,8	15,4	2,3	1,8	0,2	117
Témoins n°1	20,0	18,1	1,9	1,5	0,2	108
Buttes en terre n°1	16,0	16,7	1,7	1,3	0,2	124
Buttes forestières n°2	19,2	17,4	2,5	1,7	0,2	113
Buttes en lasagne n°2	19,6	14,4	2,1	1,6	0,2	93
Buttes sandwich n°2	17,6	14,0	2,1	1,4	0,2	100
Témoins n°2	14,0	15,1	1,5	1,2	0,2	128
Buttes en terre n°2	14,4	12,6	1,6	1,2	0,2	108



## 5.4.2 Caractéristiques physiques du sol

### 5.4.2.1 Eau disponible pour les plantes

Les résultats de l'estimation de l'eau disponible dans les buttes L1, M1, N1, J1 et H1 sont repris dans le Tableau 7. L'eau disponible pour les plantes semble être plus élevée dans le témoin L1 (4,336 cm d'eau disponible pour les plantes pour une profondeur de 35 cm) et plus faible dans la butte sandwich H1 (2,866 cm d'eau disponible pour les plantes pour une profondeur de 35 cm).

Tableau 7 : Eau disponible pour les plantes exprimée en cm sur une profondeur de 35 cm pour 5 buttes de type différent.

Butte	Eau disponible pour les plantes (cm)
Témoin L1	4,336
Terre N1	4,248
Lasagne M1	3,609
Forestière J1	3,306
Sandwich H1	2,866

### 5.4.2.2 Densité apparente sèche

Les densités apparentes du sol des différentes buttes étudiées selon la profondeur de sol peuvent être observées sur la Figure 26. Le témoin L1 semble avoir une densité apparente plus élevée à une profondeur de 15 cm, ce qui correspond à sa couche de terre de fond. La butte en lasagne M1 a une densité apparente très basse sur tout son profil jusqu'à la couche de terre de fond à 65 cm de profondeur. Le 2<sup>ème</sup> point correspond à la densité apparente de la couche de lombricompost située à [10 – 15 cm] de profondeur. La densité apparente de la butte en terre N1 à cette profondeur est plus élevée que les autres car, en raison de la fine épaisseur de compost (< 5 cm) sur cette butte, l'anneau volumétrique contenait un peu de terre.

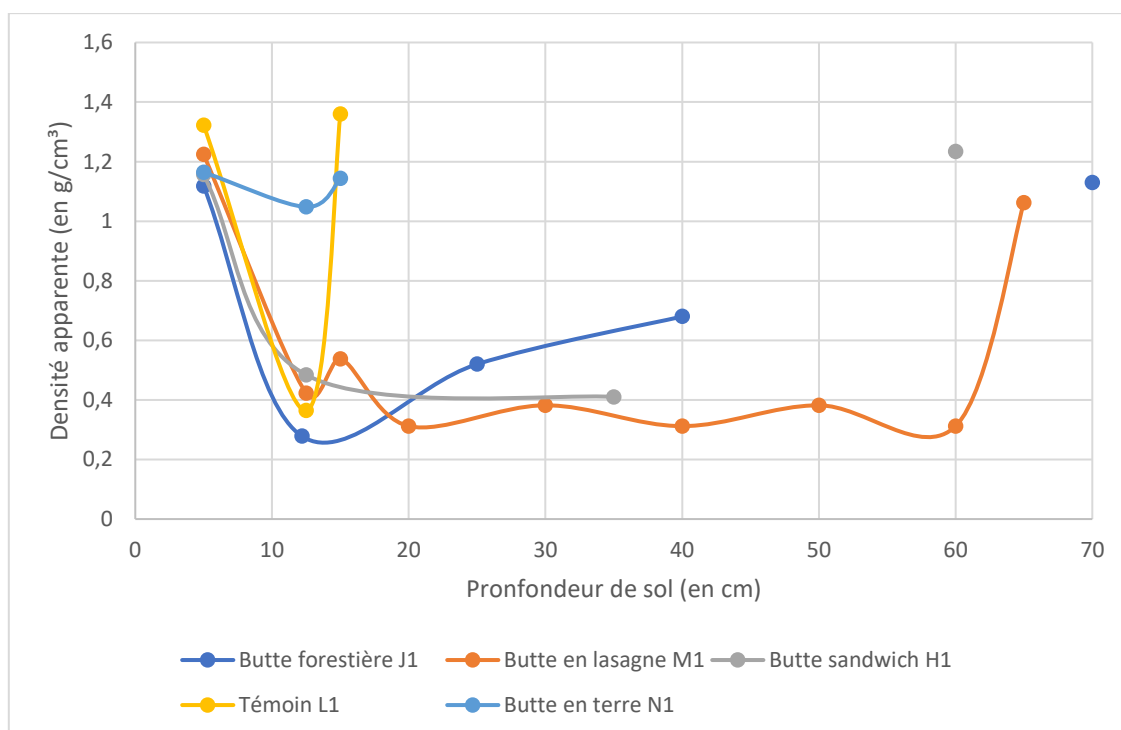


Figure 26 : Densité apparente du sol (en g/cm³) en fonction de la profondeur de sol pour 5 buttes de types différents.



### 5.4.2.3 Porosité totale

La porosité du sol des différentes buttes étudiées selon la profondeur de sol peut être observée sur la Figure 27. Lorsque la densité apparente est plus faible, la porosité est plus élevée.

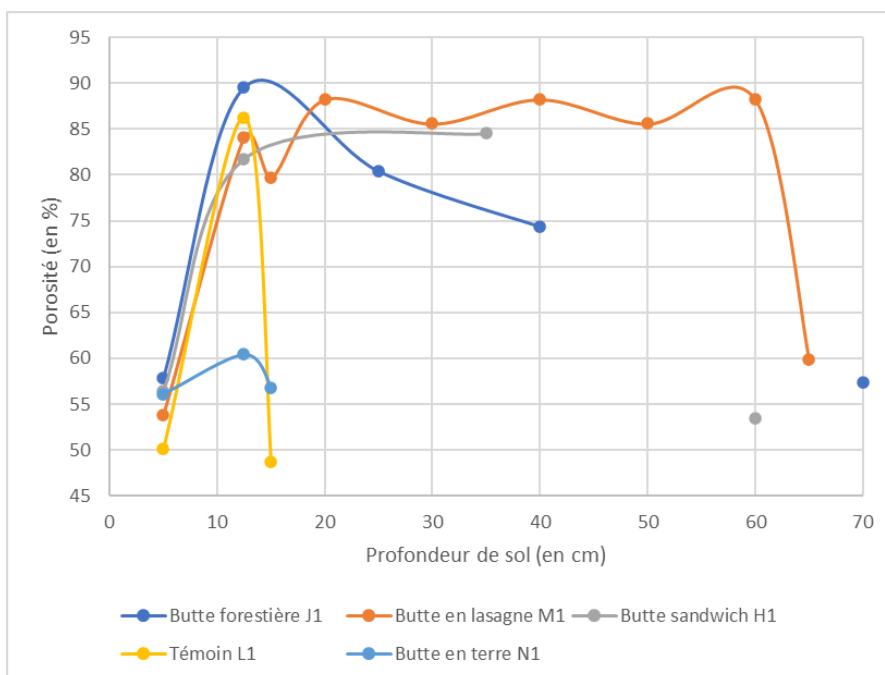


Figure 27 : Porosité du sol (en %) en fonction de la profondeur de sol pour 5 buttes de type différent.

### 5.4.2.4 Teneur en eau du sol

L'analyse statistique n'a pas mis en évidence de différence significative entre les différents types de butte ( $p$ -valeur  $> 0,05$ ). La teneur en eau des 10 premiers cm du sol durant les mois de mai et juin a varié de  $0,081 \text{ m}^3/\text{m}^3$  à  $0,484 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . En moyenne, la teneur en eau est plus faible dans les buttes sandwich ( $0,195 \pm 0,038 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) et plus élevée dans les témoins ( $0,283 \pm 0,061 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) (Figure 28). L'Annexe 8 illustre l'évolution des teneurs en eau dans les 10 premiers cm du sol des buttes n°2 du 30 avril au 28 juin 2021.

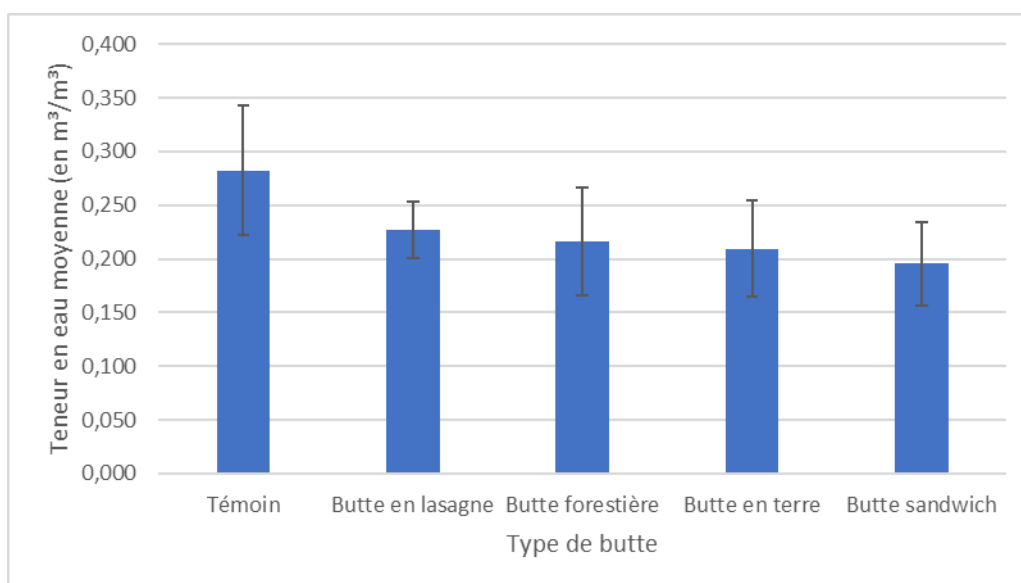


Figure 28 : Teneur en eau moyenne ( $\text{en m}^3/\text{m}^3$ ) pour chaque type de butte sur les mois de mai et juin.

#### 5.4.2.5 Température du sol

Le 24 février et le 13 mai, des différences très hautement significatives ( $p$ -valeur  $< 0,001$ ) de température du sol à 12 cm de profondeur entre les différents types de butte ont été mises en évidence. La tendance est la même aux deux dates et peut être visualisée sur la Figure 29 et la Figure 30. Le 5 mars, aucune différence significative ( $p$ -valeur  $> 0,05$ ) n'a été mise en évidence (Annexe 11).

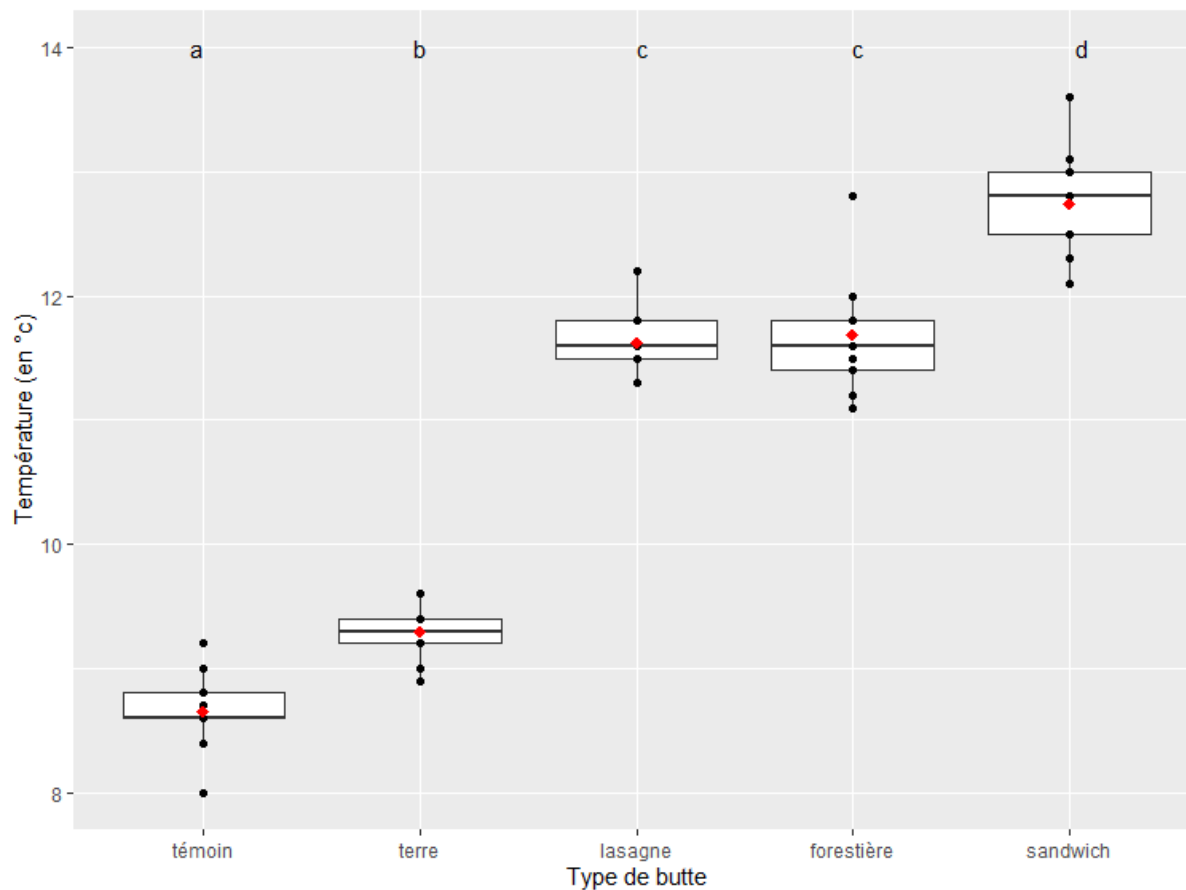


Figure 29 : Température du sol des buttes le 24 février 2021. La température moyenne pour chaque type de butte est indiquée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).

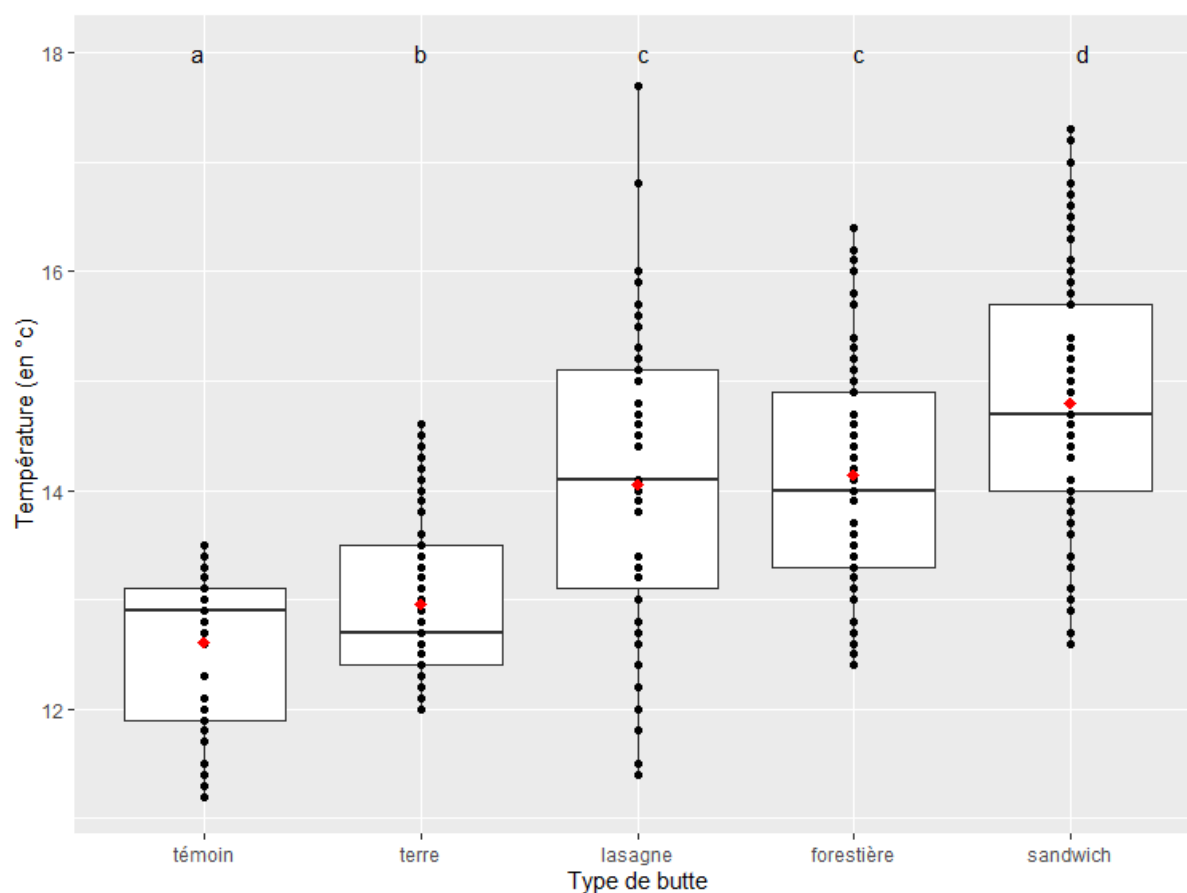


Figure 30 : Température du sol des buttes le 13 mai 2021. La température moyenne pour chaque type de butte est indiquée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).

### 5.4.3 Caractéristiques biologiques du sol

#### 5.4.3.1 Activité microbienne

Des différences très hautement significatives ( $p$ -valeur  $< 0,001$ ) d'absorbance ont été observées entre les différents types de butte (Figure 31). L'activité enzymatique dans les 10 premiers centimètres du sol est plus élevée dans les buttes sandwich et plus faible dans les buttes forestières.

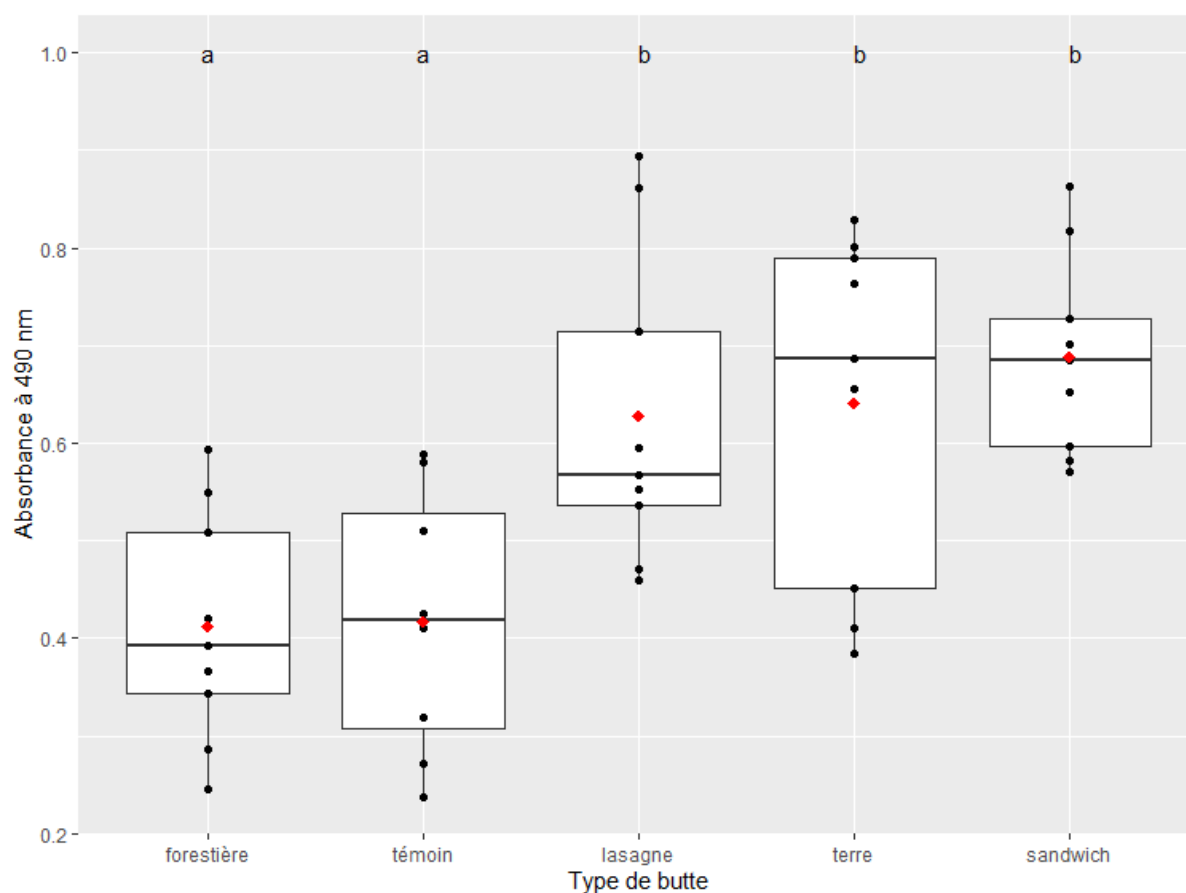


Figure 31 : Absorbance à 490 nm selon le type de butte. L'absorbance moyenne pour chaque type de butte est indiquée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).

#### 5.4.3.2 Biomasse microbienne

Des différences très hautement significatives ( $p\text{-valeur} < 0,001$ ) de biomasse microbienne ont été mises en évidence entre les différents types de buttes (Figure 32). La biomasse microbienne est en moyenne deux fois supérieure dans les buttes en lasagne par rapport aux buttes en terre et aux témoins.

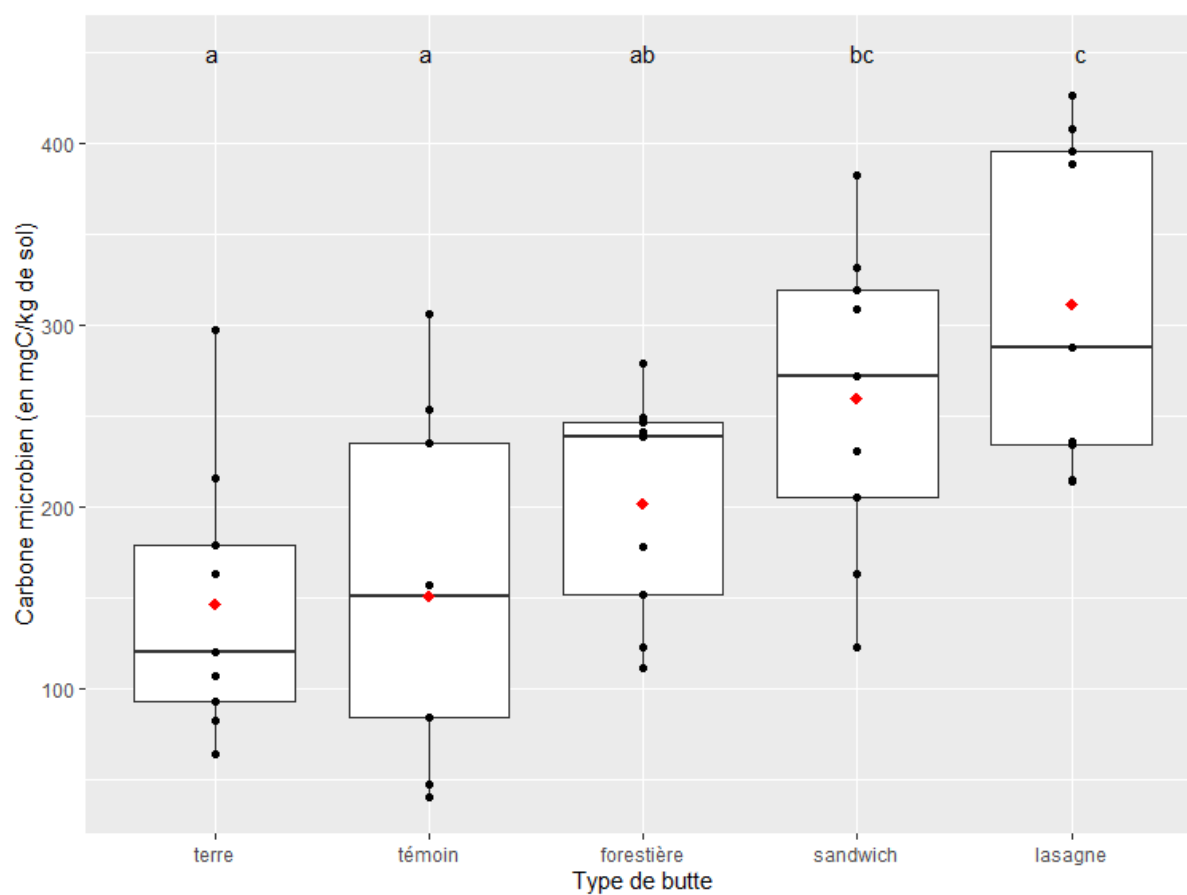


Figure 32 : Carbone microbien (en  $\mu\text{g/g}$  de sol sec) selon le type de butte. La biomasse microbienne moyenne par type de butte est indiquée par un losange rouge. Des lettres différentes indiquent que les moyennes marginales sont significativement différentes (niveau de significativité utilisé :  $\alpha = 0,05$ ).

## 6 DISCUSSION

---

En termes de biomasse, les buttes forestières sont les plus productives. Les buttes forestières n°2 semblent contenir plus de COT et d’N total que toutes les autres buttes n°2. La teneur en COT étant représentative de la teneur en MO du sol (Vincent et al., n.d.), il semblerait que les buttes forestières contiennent plus de MO dans les 40 premiers centimètres de sol que les autres types de buttes. La MO améliore les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Sequi, 1989 cité par Diacono et al., 2010). Les teneurs en MO et en N total potentiellement accrues dans le sol des buttes forestières pourraient expliquer leur meilleure productivité. L’analyse statistique du nombre de nodosités sur les racines de pois n’a pas montré de différences significatives entre les types de buttes, sans doute à cause des écarts-types trop importants. Cependant, le nombre moyen de nodosités sur les racines des pois des buttes forestières est plus faible par rapport aux autres types de buttes. Les racines de pois accueillant moins facilement les *Rhizobium* lorsque le sol est riche en composés azotés assimilables par la plante (Raven, 2014), il se pourrait que le sol des buttes forestières soit plus riche en N minéral que les autres types de buttes.

Les buttes en lasagne sont généralement les deuxièmes plus productives en termes de biomasses moyennes produites, excepté pour la laitue où les buttes en terre produisent des laitues dont la biomasse sèche est en moyenne un peu plus importante que celles des buttes en lasagne. Les buttes en lasagne ont une biomasse microbienne significativement supérieure à celle de tous les autres types de buttes, excepté les buttes sandwich, et une activité enzymatique parmi les plus élevées. Les microorganismes étant capables de minéraliser la MO présente dans le sol grâce à la production d’enzymes (Romaní et al., 2006), et de libérer ainsi les nutriments sous des formes inorganiques directement utilisables par les plantes (Jacoby et al., 2017), leur présence en grand nombre et leur activité élevée pourrait expliquer cette haute productivité. A première vue, la porosité semble plus importante dans les buttes en lasagne (d’ailleurs elles s’affaissent et se tassent avec le temps). Un sol bien aéré permet aux racines de croître sainement (Hatfield et al., 2017). La porosité est l’habitat des microorganismes du sol (Kibblewhite et al., 2008) et le lieu où s’effectuent les échanges de gaz entre le sol et l’atmosphère (Schvartz et al., 2005). La porosité intervient également dans la distribution et la disponibilité de l’eau (Kibblewhite et al., 2008). La porosité étant un élément clé dans la fertilité des sols, le sol bien aéré des buttes en lasagne sur tout leur profil de sol pourrait être à l’origine de leur bonne productivité.

Le rendement des témoins et des buttes en terre n’est pas significativement différent, excepté pour la culture du fenouil. Les buttes en terre produisent des fenouils dont la biomasse fraîche est plus élevée que celle des fenouils cultivés sur les témoins. Le fenouil aimant les sols profonds (Péron, 2006), il se pourrait qu’il se plaise mieux sur les buttes en terre parce qu’elles offrent une hauteur et un volume de sol plus importants pour les racines que les témoins. La butte favorise le réchauffement du sol en surface (à 12 cm de profondeur) grâce à sa forme arrondie, comme l’affirmait Wallner (2019). En effet, les témoins et les buttes en terre, qui diffèrent juste par leur forme, montrent des températures hautement significativement différentes ( $0,001 < p\text{-valeur} < 0,01$ ) le 24 février et significativement différentes ( $0,01 < p\text{-valeur} < 0,5$ ) le 13 mai. Aucune différence significative de température n’a été mise en évidence pour le relevé du 5 mars, sans doute à cause des températures très basses (température moyenne de  $2,2^{\circ}\text{C}$ ) et du vent du nord qui soufflait ce jour-là. Le sol des buttes en terre montre des températures supérieures à celles du sol des témoins. Cela peut être dû à une meilleure captation des rayons du soleil par les buttes en terre mais aussi à une teneur en eau en moyenne légèrement plus faible dans les buttes en terre ( $\theta_{\text{moy}} = 0,209 \pm 0,045 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) par rapport aux témoins ( $\theta_{\text{moy}} = 0,283 \pm 0,061 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ). L’eau ayant une capacité thermique plus grande que le sol sec, il faudra

plus d'énergie pour réchauffer un sol plus humide (Mustin, 1987). Les témoins ayant une teneur en eau moyenne un peu plus grande se réchaufferont donc un peu plus lentement. La vitesse de germination des graines de pois augmentant avec l'élévation de température (Raveneau, 2012), on aurait pu s'attendre à ce que les pois sur les buttes en terre lèvent avant ceux sur les témoins et soient ainsi plus avancés dans leur développement. Cependant, l'analyse statistique montre que les stades phénologiques des pois sur les buttes en terre ne diffèrent pas significativement de ceux des pois sur les témoins. Il est à noter que les pois ont été très endommagés par les pigeons ramiers et ce dès leur émergence, rendant compliquée la détermination des stades.

En ce qui concerne les oignons tiges, les laitues, les épinards et les fenouils, les résultats montrent que les buttes sandwich sont les moins productives en termes de biomasse produite, et qu'elles ne diffèrent pas significativement des témoins. Ces cultures sont gourmandes en N. En effet, les laitues, les oignons tiges, les fenouils et les épinards ont des besoins en N respectifs de 60, 100, 200 et 220 kg/ha (Joly, 1986; Heens, 2013; Hallouin et al., 2014; F., August-7-2021). Sur les buttes sandwich, ces cultures présentaient toutes des symptômes révélateurs d'une fumure inadéquate tels que le jaunissement des feuilles d'épinard et leur chute précoce, l'aspect vert pâle du feuillage des oignons, laitues et fenouils, le manque de vigueur des plans et la non-pomaison des laitues (Joly, 1986; Heens, 2013; Chaput, July-30-2021). Cependant, l'analyse chimique du sol des buttes sandwich n°2 montre des teneurs en éléments nutritifs élevées et un pH idéal. Leur teneur en N total, c'est-à-dire l'ensemble de l'N présent sous forme minérale et organique dans le sol (Chambre d'agriculture d'Occitanie, 2011), semble supérieure à celle des témoins n°2 qui pourtant ne présentent pas ces symptômes. La faible production de biomasse des buttes sandwich et les symptômes observés pourraient être associés à une faim d'N dans le sol de ces buttes étant donné la nature très carbonée du substrat. En effet, il se pourrait que l'N minéral soit immobilisé par la biomasse microbienne assez importante dans le sol des buttes sandwich. Dans ce cas, on aurait pu s'attendre à observer plus de nodosités sur les racines de pois de ces buttes. En effet, les racines de pois accueillent plus facilement les *Rhizobium* lorsque le sol est pauvre en composés azotés assimilables par la plante (Raven, 2014). Il est à noter que l'analyse chimique des échantillons de sol suggère qu'au moment de l'échantillonnage, le rapport C organique sur N total n'était pas plus élevé dans les buttes sandwich que dans les autres. Autrement dit, la MO dans les buttes sandwich ne se décomposerait pas plus lentement que la MO dans les autres types de buttes. En effet, l'activité microbienne plus élevée pour les buttes sandwich témoigne d'un processus très actif de décomposition de la MO.

Selon Morez (s. d.), la butte sandwich permet de diminuer les apports en eau par rapport à une agriculture classique et d'augmenter la productivité d'environ 50% par rapport à une culture traditionnelle. Les résultats de cette première année d'expérimentation ne semblent pas aller dans ce sens. En effet, le Tableau 7 montre que l'eau disponible pour les plantes semble être plus élevée dans le témoin L1 (4,336 cm d'eau disponible pour les plantes sur une profondeur de 35 cm) et plus faible dans la butte sandwich H1 (2,866 cm d'eau disponible pour les plantes sur une profondeur de 35 cm). Cela signifie que si les plantes consommaient 3 mm d'eau par jour, il y aurait environ 14 jours et 9 jours d'approvisionnement en eau dans les 35 premiers cm du sol du témoin L1 et de la butte sandwich H1 respectivement. Cet aperçu de la disponibilité en eau pour les plantes dans les 2 buttes à un instant donné est cohérent avec les observations faites sur la teneur en eau dans les 10 premiers cm du sol des buttes. Les témoins ont une teneur en eau moyenne dans les 10 premiers cm de sol 1,4 fois plus élevée que celle des buttes sandwich. Les buttes sandwich sont donc en moyenne un peu plus sèches que les témoins dans les 10 premiers cm de sol, même si l'analyse statistique n'a pas révélé de différence significative de teneur en eau entre les différents types de buttes, y compris les témoins. De plus, la production en termes de biomasse des buttes sandwich ne diffère pas significativement de celle des témoins. La butte sandwich ne permet donc pas de diminuer les apports en eau par rapport

à une agriculture classique, ni d'augmenter la productivité d'environ 50% par rapport à une culture traditionnelle en première année de culture dans les conditions pédoclimatiques de cet essai.

A première vue, les résultats obtenus dans ce travail rejoignent les observations faites par Araya et al. (2021) qui montrent que l'ajout de MO réduit la densité apparente. En effet, à partir de 15 cm de profondeur, les buttes contenant de la MO semblent avoir une densité apparente plus faible que les buttes en terre et les témoins. Un sol avec une densité apparente sèche plus faible présente une porosité totale plus importante bénéfique pour la fertilité des sols (Reynolds et al., 2008).

Selon Wallner (2019), la culture sur butte offrirait l'avantage d'un sol plus aéré. A première vue, les résultats obtenus dans ce travail vont dans ce sens. En effet, la Figure 27 montre qu'à partir de 15 cm de profondeur, les buttes, et plus particulièrement celles contenant de la MO, semblent avoir une plus grande porosité totale que les témoins. Araya et al. (2021) ont également observé que l'aération du sol était améliorée dans les lits de culture surélevés permanents.

Selon Laffoon (2016), les buttes forestières âgées de 1 ou 2 ans augmentent la teneur en eau du sol dans les 30 premiers centimètres. Dans les conditions pédoclimatiques de cet essai, aucune différence significative de teneur en eau dans les 10 premiers cm de sol n'a été mise en évidence entre les différents types de buttes y compris les témoins. Zhang et al. (2012) n'ont pas non plus observé de différences significatives de teneur en eau dans les 20 premiers cm de sol entre les lits de culture surélevés âgés de quelques mois dans lesquels étaient incorporés les résidus de culture, et les lits de culture plats traditionnels.

Araya et al. (2021) ont montré, grâce à une analyse de l'eau disponible pour les plantes, que les lits de culture surélevés permanents, sur lesquels étaient laissés les résidus de culture, mis en place il y a 9 ans amélioraient la capacité de stockage de l'eau. Les résultats obtenus pour cette première année d'expérimentation ne vont pas dans ce sens. En effet, l'eau disponible pour les plantes sur une profondeur de 35 cm semble plus élevée dans les témoins plats que dans les buttes qui contiennent de la MO. Selon Araya et al. (2021), les effets bénéfiques des buttes permanentes sont généralement observés après plusieurs années. Il faudra peut-être attendre quelques années avant d'observer une amélioration de la capacité de stockage de l'eau des buttes.

L'apport de MO sur les terres cultivées peut augmenter la biomasse microbienne du sol (Vincent et al., n.d.; Diacono et al., 2010). Ceci rejoint les résultats obtenus dans ce travail. Les buttes en lasagne et les buttes sandwich, toutes deux constituées de MO, diffèrent significativement des témoins et des buttes en terre. La biomasse microbienne est plus élevée dans les buttes en lasagne ( $311,83 \pm 91,17$  mgC/kg de sol) et plus faible dans les buttes en terre ( $146,93 \pm 74,92$  mgC/kg de sol). Les valeurs obtenues sont cohérentes avec les valeurs de biomasse microbienne généralement retrouvées dans les sols en culture en Wallonie. En effet ces derniers présentent généralement une biomasse microbienne comprise entre 200 et 600 mgC/kg de sol (Vincent et al., n.d.). Limon-Ortega et al. (2006) ont également constaté que le carbone microbien était plus important dans les lits surélevés permanents où les résidus de culture ont été laissés. Même si l'analyse statistique révèle que les buttes forestières ne diffèrent pas significativement des témoins et des buttes en terre en termes de biomasse microbienne, la biomasse microbienne des buttes forestières est augmentée de 33% en moyenne par rapport aux témoins et de 36% par rapport aux buttes en terre. Il faut garder à l'esprit que la biomasse microbienne varie dans le temps car elle dépend notamment des conditions environnementales telles que la température, l'humidité, les réserves en MO, la structure, la porosité, le pH, ... (Vincent et al., n.d.).



## 7 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

---

La culture sur butte de style permacole a une influence sur le rendement et les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol par rapport à la culture sur sol non butté, et ce dès la première année de mise en culture. Plusieurs observations ont pu être faites :

- Le COT et l'N total semblent plus élevés dans les buttes forestières, en lasagne et sandwich sans doute grâce à l'apport de MO.
- La densité apparente semble plus faible et la porosité totale plus élevée dans les buttes en lasagne, forestières et sandwich, sans doute pour la même raison.
- Les témoins et les buttes en terre semblent contenir plus d'eau disponible pour les plantes que les buttes contenant de la MO.
- La butte favorise le réchauffement du sol à 12 cm de profondeur grâce à sa forme arrondie.
- La culture sur buttes composées de MO augmente significativement la biomasse microbienne.
- L'activité microbienne est plus élevée dans les buttes sandwich, en terre et en lasagne.
- La production de biomasse végétale est considérablement supérieure sur les buttes forestières par rapport aux témoins non buttés certainement grâce à une meilleure fertilité chimique (COT et N total plus élevés) et physique (densité apparente plus faible et porosité plus élevée) dues à l'apport de MO.
- Les buttes sandwich sont les moins productives, sans doute à cause d'une faim d'N.

Les effets bénéfiques des buttes permanentes étant généralement observés après plusieurs années (Araya et al., 2021), l'étude de la fertilité des buttes de style permacole nécessitera plusieurs années.

Un suivi annuel de la fertilité chimique du sol devrait être réalisé à l'aide des indicateurs utilisés dans ce travail. La détermination de la minéralisation nette de l'N, réalisée en laboratoire par incubation de terre en conditions de température et d'humidité contrôlées, serait intéressante à faire sur le sol des buttes sandwich afin d'obtenir plus d'informations sur la disponibilité de l'N pour les plantes. Une quantité d'N minéralisée très faible indiquerait une immobilisation de l'N par la biomasse microbienne et confirmerait l'hypothèse d'une faim d'N dans le sol de ces buttes. Étant donné que la teneur en nitrate dans les épinards augmente avec des doses croissantes d'N (Péron, 2006), l'analyse de la teneur en nitrate dans les tissus foliaires des épinards secs permettrait de voir quel type de butte possède le plus d'N disponible pour la plante dans son sol. Une analyse de la distribution de la MO dans les fractions granulométriques/agrégats du sol pourrait être faite dans 10 ans afin de voir dans quelle mesure les buttes constituées de MO stockent le CO (est-ce que le CO va augmenter dans la fraction fine, signifiant que la MO réagit avec la fraction minérale pour former des associations organo-minérales stables, ou bien est-ce que le CO va augmenter dans la fraction grossière, signifiant que le sol est riche en CO labile impliqué dans la biodisponibilité des nutriments et l'agrégation (Vincent et al., n.d.; de Tombeur et al., 2018).

Dans ce travail, les données de rétention en eau du sol ont permis d'obtenir des informations intéressantes et contrastées sur la capacité du sol à conserver/stocker l'eau (PAW). Un suivi annuel de la quantité d'eau disponible pour les plantes dans les buttes serait intéressant à réaliser pour voir si les buttes améliorent la capacité de stockage de l'eau au cours du temps. Un test d'infiltrométrie pourrait être réalisé pour vérifier si les buttes ont également un effet drainant.

Comme aucun apport n'est prévu sur les buttes et les témoins tout au long de l'expérimentation, une analyse du taux de colonisation racinaire par les CMA pourrait être intéressante à réaliser si les teneurs en P ou en N dans le sol deviennent faibles. D'autres analyses de la biomasse microbienne devraient être faites au cours du temps pour voir si les mêmes tendances sont observées. L'analyse de l'N

microbien en plus de l'analyse du C microbien permettrait de calculer le rapport  $C_{mic}/N_{mic}$  qui informe sur la composition relative en bactéries et en champignons de la communauté microbienne (Vincent et al., n.d.).

Ce travail a permis pour la première fois de comparer et de caractériser la productivité et la fertilité de différentes buttes de style permacole âgées de quelques mois et placées dans un même endroit. Il devrait servir de base pour les futures observations qui seront réalisées sur ces buttes.

## CONTRIBUTION PERSONNELLE

---

Au cours de ce travail de fin d'études, j'ai mis les cultures en place et procédé à leur récolte. J'ai suivi la croissance des pois et collecté les données de biomasses des cultures. J'ai récolté les racines de pois, fait la coloration des mycorhizes et compté les nodosités. J'ai également récolté les données de température et de teneur en eau du sol. J'ai collecté les échantillons de sol pour l'analyse chimique, l'analyse de la biomasse microbienne et l'analyse de l'activité enzymatique. J'ai effectué ces deux dernières analyses ainsi que la détermination de la CEC, des bases échangeables et du taux de saturation. J'ai réalisé les analyses statistiques, synthétisé les résultats, interprété les données et rédigé ce travail.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Abbott L.K. & Murphy D. V., 2007. What is soil biological fertility? *In*: Abbott, L.K., Murphy, D.V. eds. *Soil Biological Fertility: A Key to Sustainable Land Use in Agriculture*. Springer, 1–15.
- Adam G. & Duncan H., 2001. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biol. Biochem.* **33**, 943–951, DOI:10.1016/S0038-0717(00)00244-3.
- Adams A., Barak P. & Davidson C., 2013. Hugelkultur Gardening Technique Does not Result in Plant Nutrient Deficiencies and is a Potential Source Reduction Strategy for Yard Trimmings Wastes.
- Anonyme, 2011. Guide pratique du potager synergique.
- Anonyme, 2021. Jardinage en lasagnes — Wikipédia.  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Jardinage\\_en\\_lasagnes#cite\\_ref-1](https://fr.wikipedia.org/wiki/Jardinage_en_lasagnes#cite_ref-1), (24/05/2021).
- Araya T., Gebremedhin A., Baudron F., Hailemariam M., Birhane E., Nyssen J., Govaerts B. & Cornelis W., 2021. Influence of 9 years of permanent raised beds and contour furrowing on soil health in conservation agriculture based systems in Tigray region, Ethiopia. *L. Degrad. Dev.* **32**(3), 1525–1539, DOI:10.1002/ldr.3816.
- Bloem J., Ruiter P. de & Bouwman L., 1997. Soil food webs and nutrient cycling in agroecosystems. *Mod. soil Microbiol.* 245–278.
- Bronick C.J. & Lal R., 2005. Soil structure and management: A review. *Geoderma* **124**, 3–22, DOI:10.1016/j.geoderma.2004.03.005.
- Capowiez Y., Cadoux S., Bouchant P., Ruy S., Roger-Estrade J., Richard G. & Boizard H., 2009. The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil Tillage Res.* **105**, 209–216, DOI:10.1016/j.still.2009.09.002.
- Chalker-Scott L., 2017. Hugelkultur : what is it, and should it be used in home gardens ?
- Chambre d'agriculture d'Occitanie, 2011. Les critères analytiques des produits organiques. *In*: *Les Produits Organiques Utilisables En Agriculture En Languedoc-Roussillon - Tome 1*. 63–76.
- Chan K.Y., 2001. An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity — implications for functioning in soils. *Soil Tillage Res.* **57**, 179–191, DOI:10.1016/S0167-1987(00)00173-2.
- Chaput J., July-30-2021. Identification des maladies et des affections de l'oignon.  
<http://www.omafr.gov.on.ca/french/crops/facts/95-064.htm>, (30/07/2021).
- Chenu C., Roger-Estrade J., Gascuel C. & Walter C., 2018. Soils, a factor in plant production: Agroecosystems. *In*: Berthelin, J., Valentin, C., Munch, J.C. eds. *Soils as a Key Component of the Critical Zone 1: Functions and Services*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons, 147–162.
- Cosentino D., Chenu C. & Le Bissonnais Y., 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biol. Biochem.* **38**(8), 2053–2062, DOI:10.1016/j.soilbio.2005.12.022.
- Cosentino D.J., 2006. Contribution des matières organiques à la stabilité de la structure des sols limoneux cultivés. Effet des apports organiques à court terme.
- de Tombeur F., Sohy V., Chenu C., Colinet G. & Cornelis J.T., 2018. Effects of permaculture practices on soil physicochemical properties and organic matter distribution in aggregates: A case study of the bec-hellouin farm (France). *Front. Environ. Sci.* **6**, DOI:10.3389/fenvs.2018.00116.

- Diacono M. & Montemurro F., 2010. Long-term effects of organic amendments on soil fertility. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **30**, 401–422, DOI:10.1051/agro/2009040.
- F., August-7-2021. Le fenouil, un légume qui gagne à être connu des maraîchers - SillonBelge.be. <https://www.sillonbelge.be/1353/article/2017-09-21/le-fenouil-un-legume-qui-gagne-etre-connu-des-maraichers>, (07/08/2021).
- Foudral M., May-24-2021. Droit aux buttes | Prise de Terre. <https://prise2terre.wordpress.com/2011/10/25/droit-aux-buttes/>, (24/05/2021).
- Gayan A., Nath D.J., Bhattacharyya B. & Dutta N., 2020. Assessment of soil quality indicators under rice ecosystem of Assam, India. *J. Environ. Biol.* **41**, 1655–1664.
- Genot N., Renneson M., Colinet G., Goffaux M.-J., Cugnon T., Toussaint B., Buffet D. & Oger R., 2012. Base de données sols de REQUASUD [3ème synthèse].
- Genot V., Colinet G. & Bock L., 2007. La fertilité des sols en Région Wallonne.
- Giovanni C., Nicolas P. & Ciesielski H., n.d. Dosage du carbone organique par combustion sèche après décarbonatation automatisée des sols.
- Gliński J. & Stępniewski W., 2018. Soil Air and Plant Response. *Soil Aeration Its Role Plants* 137–171, DOI:10.1201/9781351076685-6/SOIL-AIR-PLANT-RESPONSE-JAN-GLI.
- Gros A., 1979. *Engrais. Guide pratique de la fertilisation*, Paris: Maison Rustique.
- Hallouin I., Mazollier C. & Ferrera S., 2014. Oignon botte et Oignon de conservation.
- Hatfield J.L., Sauer T.J. & Cruse R.M., 2017. Soil: The Forgotten Piece of the Water, Food, Energy Nexus. *Adv. Agron.* **143**, 1–46, DOI:10.1016/BS.AGRON.2017.02.001.
- Heens B., 2013. Fertilisation azotée des légumes industriels. *Biotechnol. Agron. Soc. Env.* **17**(S1), 207–214.
- Holzer S., 2011. *Sepp Holzer's permaculture : practical guide to small-scale, integrative farming and gardening*. Whitefield, P., Sapsford-Francis, A. eds., White River Junction: Chelsea Green Publishing.
- Hubert G. & Schaub C., 2011. La fertilité des sols : L'importance de la matière organique.
- IPCC, 2019. IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems. Summary for Policymakers.
- IRM, 2020. Statistiques climatiques des communes belges, Gembloux.
- Jacoby R., Peukert M., Succurro A., Koprivova A. & Kopriva S., 2017. The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. *Front. Plant Sci.* **8**, DOI:10.3389/fpls.2017.01617.
- Jangorzo N.S., 2013. Quantification du processus d'agrégation dans les Technosols.
- Joly J., 1986. *La fumure des plantes de jardin (engrais, jardin et santé)*, Dargaud.
- Kibblewhite M.G., Ritz K. & Swift M.J., 2008. Soil health in agricultural systems. *Philos. Trans. R. Soc. B* **363**, 685–701, DOI:10.1098/rstb.2007.2178.
- Laffoon M., 2016. A Quantitative Analysis Of Hugelkultur And Its Potential Application On Karst Rocky Desertified Areas In China.

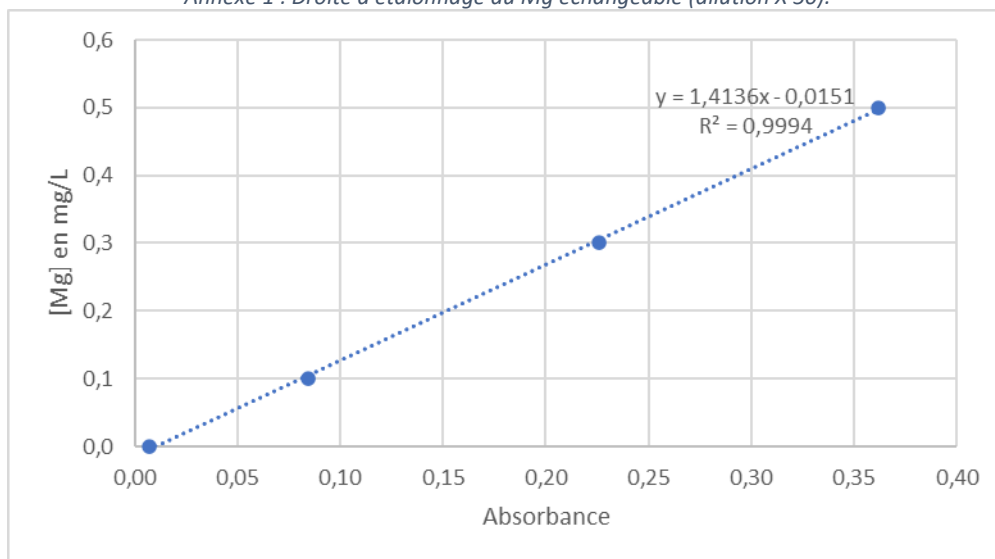
- Le Cam V., 2019. Gestion durable de la fertilité des sols : étude des pratiques innovantes des maraîchers biologiques diversifiés du Grand Ouest.
- Lehmann J. & Kleber M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* **528**, 60–68, DOI:10.1038/nature16069.
- Limon-Ortega A., Govaerts B., Deckers J. & Sayre K.D., 2006. Soil aggregate and microbial biomass in a permanent bed wheat–maize planting system after 12 years. *F. Crop. Res.* **97**, 302–309, DOI:10.1016/J.FCR.2005.11.001.
- Meier U., 2001. Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées, Centre Fédéral de Recherches Biologiques pour l'Agriculture et les Forêts, 1–86.
- Mendes R., Garbeva P. & Raaijmakers J.M., 2013. The rhizosphere microbiome: Significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiol. Rev.* **37**, 634–663, DOI:10.1111/1574-6976.12028.
- Miles M., 2010. The Art and Science of Making a Hugelkultur Bed – Transforming Woody Debris into a Garden Resource. <https://www.permaculturenews.org/2010/08/03/the-art-and-science-of-making-a-hugelkultur-bed-transforming-woody-debris-into-a-garden-resource/>, (23/05/2021).
- Morez R., n.d. L'agroécologie, gestion de la Terre nourricière.
- Mustin M., 1987. *Le compost : gestion de la matière organique*, Paris: François Dubusc.
- Pardo A., Amato M. & Chiarandà F.Q., 2000. Relationships between soil structure, root distribution and water uptake of chickpea (*Cicer arietinum* L.). Plant growth and water distribution. *Eur. J. Agron.* **13**, 39–45, DOI:10.1016/S1161-0301(00)00056-3.
- Péron J.-Y., 2006. *Références productions légumières*, Cachan: Lavoisier.
- Radcliffe D.E. & Šimunek J., 2010. *Soil physics with HYDRUS : modeling and applications*, Boca Raton, Floride: CRC Press.
- Raven P.H., 2014. *Biologie*. Johnson, G.B., Mason, K.A., Losos, J.B., Singer, S.R., Bouharmont, J., Masson, P.L., Van Hove, C., Arnould, T. eds., Bruxelles: De Boeck.
- Raveneau M.-P., 2012. Effet des vitesses de dessiccation de la graine et des basses températures sur la germination du pois protéagineux.
- Reeves D.W., 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.* **43**(1–2), 131–167, DOI:10.1016/S0167-1987(97)00038-X.
- Reynolds W.D., Drury C.F., Yang X.M. & Tan C.S., 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma* **146**, 466–474, DOI:10.1016/J.GEODERMA.2008.06.017.
- Romaní A.M., Fischer H., Mille-Lindblom C. & Tranvik L.J., 2006. Interactions of bacteria and fungi on decomposing litter: Differential extracellular enzyme activities. *Ecology* **87**(10), 2559–2569, DOI:10.1890/0012-9658(2006)87[2559:IOBAFO]2.0.CO;2.
- Salducci X., 2007. Qualité des matières organiques des sols : une nouvelle génération d'analyses de routine. In: *Fertilisation et Analyse de Terre: Quoi de Neuf ?* Blois.
- Sánchez-Monedero M.A., Mondini C., Cayuela M.L., Roig A., Contin M. & De Nobi M., 2008. Fluorescein diacetate hydrolysis, respiration and microbial biomass in freshly amended soils. *Biol. Fertil. Soils* **44**, 885–890, DOI:10.1007/s00374-007-0263-1.
- Schvartz C., Muller J.-C. & Decroux J., 2005. *Guide de la fertilisation raisonnée : Grandes cultures et*

*prairies.*, Paris: France Agricole.

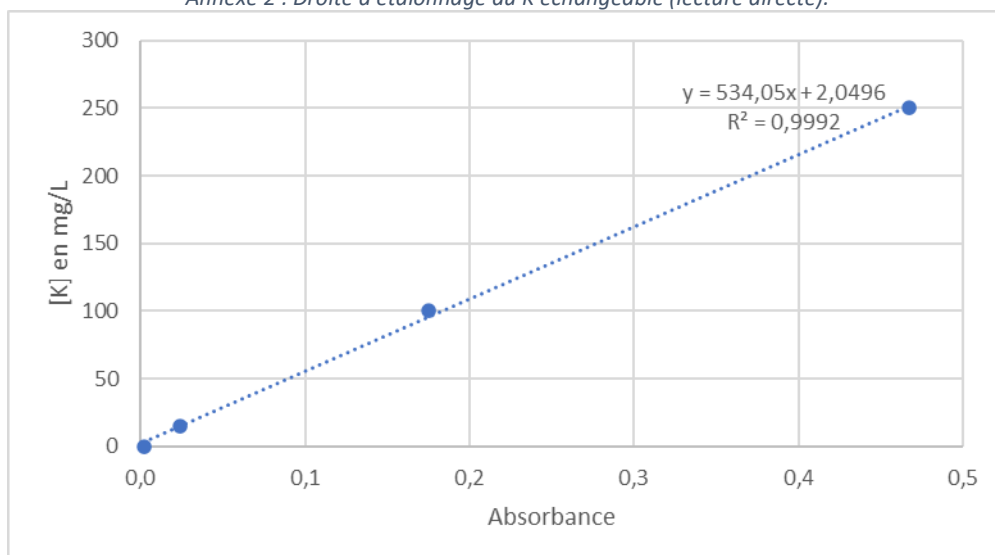
- Sharma S.K., Ramesh A., Sharma M.P., Joshi O.P., Govaerts B., Steenwerth K.L. & Karlen D.L., 2010. Microbial Community Structure and Diversity as Indicators for Evaluating Soil Quality. In: Lichtfouse, E. ed. *Biodiversity, Biofuels, Agroforestry and Conservation Agriculture. Sustainable Agriculture Reviews, Vol 5*. Dordrecht: Springer, 317–358.
- Six J., Elliott E.T. & Paustian K., 2000. Soil Structure and Soil Organic Matter II. A Normalized Stability Index and the Effect of Mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **64**(3), 1042–1049, DOI:10.2136/sssaj2000.6431042x.
- Thibault C. & Lecompte F., 2018. Gestion de la fertilité des sols en cultures légumières et maraîchères. Rapport d'étude du GIS Piclé.
- Tiessen H., Cuevas E. & Chacon P., 1994. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility. *Nature* **371**, 783–785, DOI:10.1038/371783a0.
- Tisdale S.L., Werner L.N., Beaton J.D. & Halvin J.L., 1993. *Soil fertility and fertilizers*. Corey, P.F. ed., New York: Macmillan Publishing Company.
- Trigalet S., Chartin C., Kruger I., Carnol M., Van Oost K. & van Wesemael B., 2017. Soil organic carbon fractionation for improving agricultural soil quality assessment-a case study in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnol. Agron. Soc. Env.* **21**(S1).
- Trouvelot A., Kough J. & Gianinazzi-Pearson V., 1986. Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. *Physiol. Genet. Asp. Mycorrhizae*.
- Vierheilig H., Coughlan A.P., Wyss U. & Piché Y., 1998. Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* **64**(12), 5004–5007, DOI:10.1128/aem.64.12.5004-5007.1998.
- Vincent Q., Chartin C., Krüger I., Van Wesemael B. & Carnol M., n.d. La qualité biologique et le carbone organique des sols agricoles en Wallonie.
- Wallner R., 2019. *Réussir la culture sur butte*, Paris: Rustica editions.
- Wang C. yu, Zhou X., Guo D., Zhao J. hua, Yan L., Feng G. zhong, Gao Q., Yu H. & Zhao L. po, 2019. Soil pH is the primary factor driving the distribution and function of microorganisms in farmland soils in northeastern China. *Ann. Microbiol.* **69**, 1461–1473, DOI:10.1007/s13213-019-01529-9.
- Wiesmeier M., Urbanski L., Hobley E., Lang B., von Lützow M., Marin-Spiotta E., van Wesemael B., Rabot E., Ließ M., Garcia-Franco N., Wollschläger U., Vogel H.J. & Kögel-Knabner I., 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* **333**, 149–162, DOI:10.1016/J.GEODERMA.2018.07.026.
- Willekens K., Vandecasteele B., Buchan D. & De Neve S., 2014. Soil quality is positively affected by reduced tillage and compost in an intensive vegetable cropping system. *Appl. Soil Ecol.* **82**, 61–71, DOI:10.1016/j.apsoil.2014.05.009.
- Zakem E.J., Cael B.B. & Levine N.M., 2021. A unified theory for organic matter accumulation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **118**(6), DOI:10.1073/pnas.2016896118.
- Zhang X., Ma L., Gilliam F.S., Wang Q. & Li C., 2012. Effects of raised-bed planting for enhanced summer maize yield on rhizosphere soil microbial functional groups and enzyme activity in Henan Province, China. *F. Crop. Res.* **130**, 28–37, DOI:10.1016/j.fcr.2012.02.008.

## ANNEXES

Annexe 1 : Droite d'étalonnage du Mg échangeable (dilution X 50).

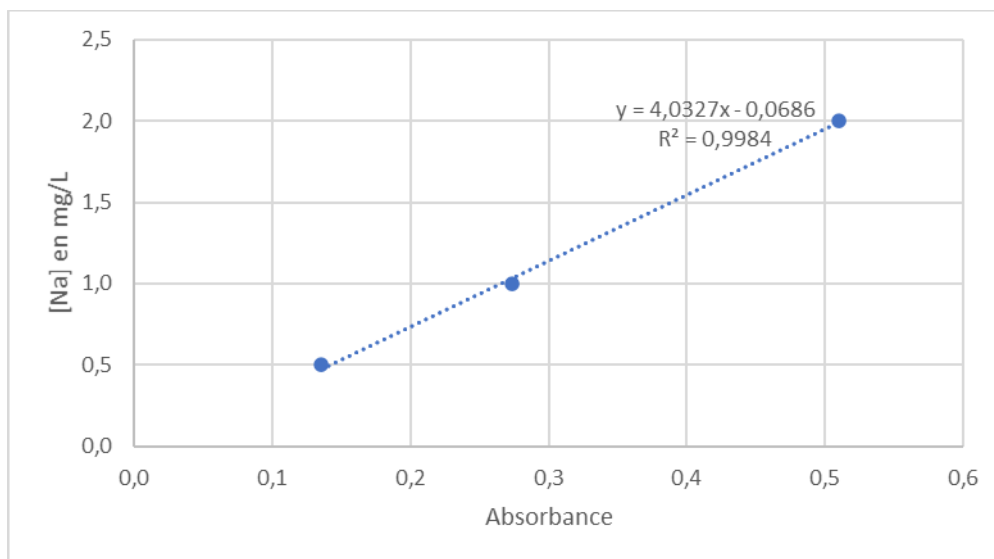


Annexe 2 : Droite d'étalonnage du K échangeable (lecture directe).

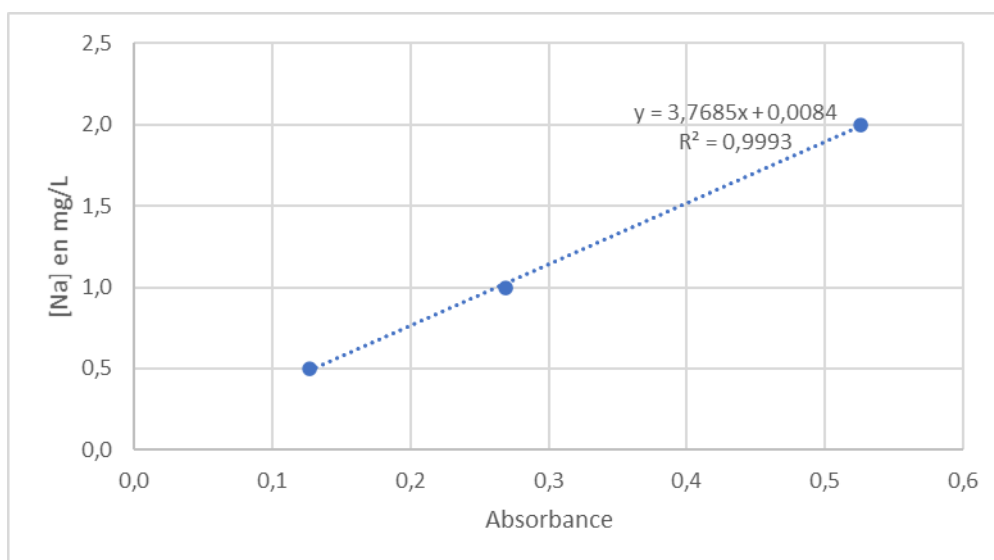




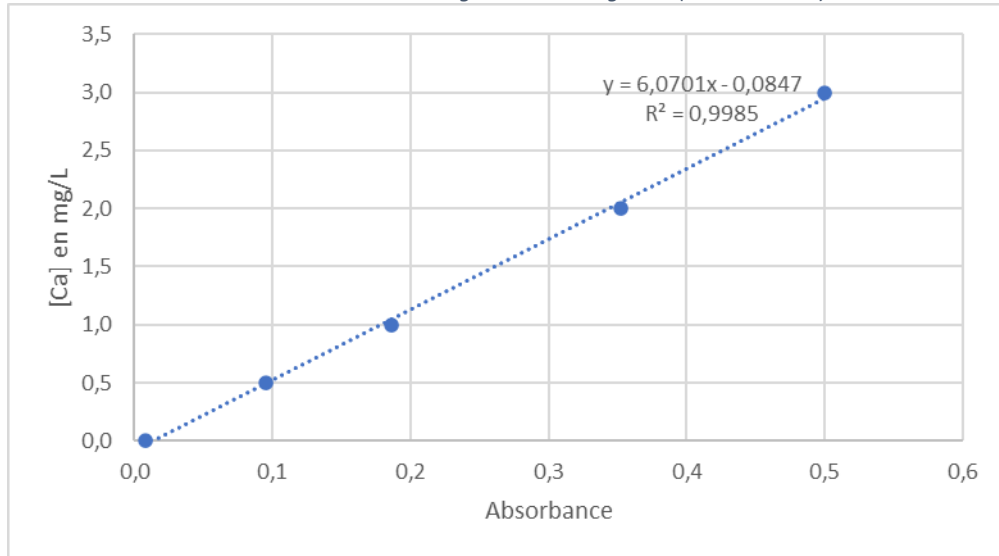
Annexe 3 : Droite d'étalonnage du Na échangeable (lecture directe).



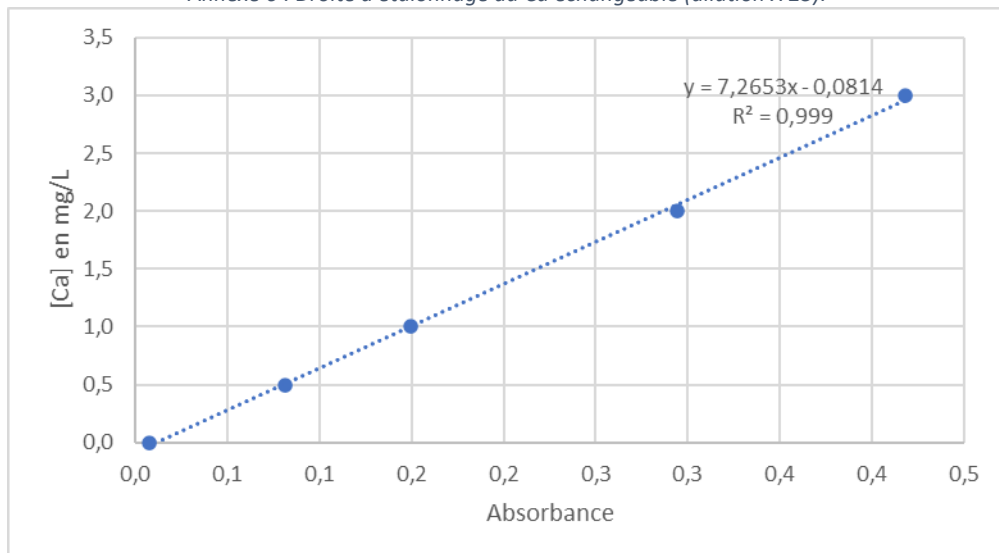
Annexe 4 : Droite d'étalonnage du Na échangeable (dilution X 2,5).



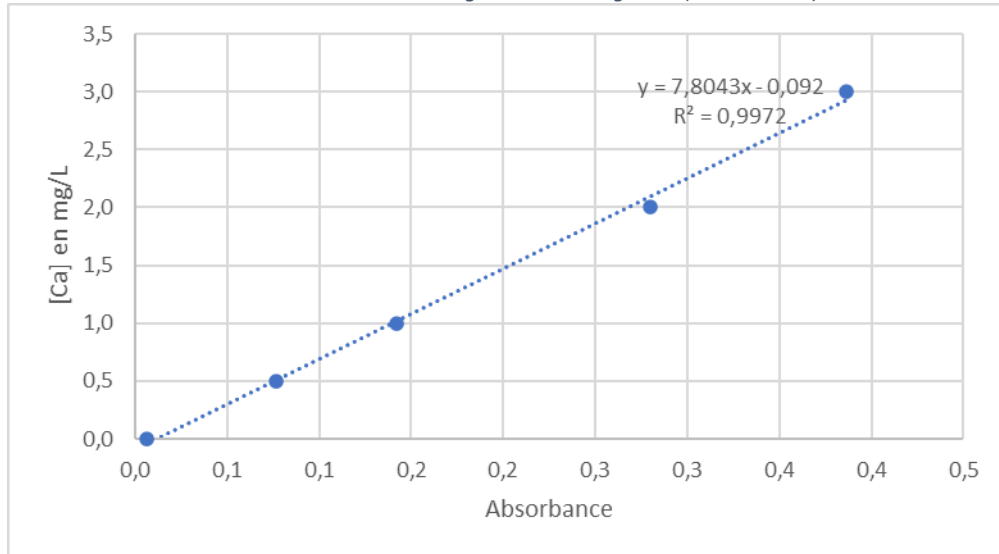
Annexe 5 : Droite d'étalonnage du Ca échangeable (dilution X 100).



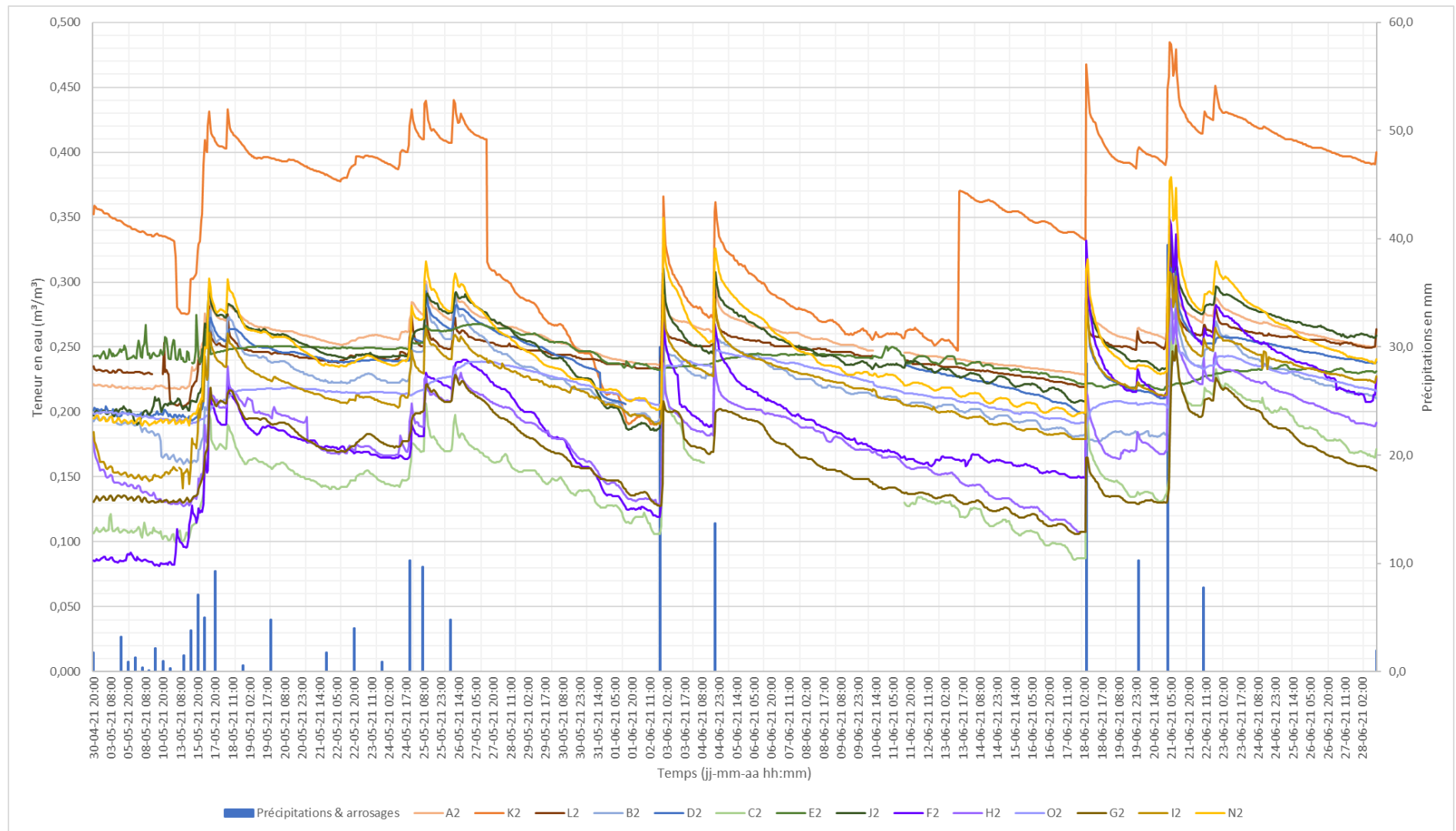
Annexe 6 : Droite d'étalonnage du Ca échangeable (dilution X 25).



Annexe 7 : Droite d'étalonnage du Ca échangeable (dilution X 75).



Annexe 8 : Évolution de la teneur en eau dans les 10 premiers cm du sol des buttes n°2 du 30 avril au 28 juin 2021. Les événements pluvieux sont indiqués par des barres bleues.



1. **Prélèvement de la terre sur le terrain.** Prélever un volume représentatif de sol (1seau) par couche analysée à la profondeur souhaitée.
2. **Préparation pré-séchage de la terre.** Pour chaque couche, la terre est répandue dans des bacs en fine couche (1-2cm). Un fractionnement est effectué à la main (pré-tri des cailloux et racines, cassage des mottes).
3. **Séchage.** La terre est séchée à l'étuve à température ambiante avec une circulation d'air. S'il n'y a pas d'étuve à disposition, un séchage à l'air libre est également possible. Prévoir deux semaines pour un séchage complet, ainsi qu'un malaxage occasionnel.
4. **Préparation post-séchage de la terre.** Le fractionnement est finalisé (élimination des fractions plus grossières que ~5mm). Cela peut soit se faire à la main, soit par tamisage. La terre est alors stockée dans des seaux séparés pour chaque couche.
5. **Extraction du volume expérimental de sol** (Figure 1). Connaissant la densité apparente du sol et le volume du récipient, la masse de terre à introduire dans le cylindre est connue. Dans le cas du 10HS, une forme tronconique de diamètres 10.6 et 9.9 cm pour une hauteur de 21.2 cm a été choisie (1750 cm<sup>3</sup>). Cette terre est pesée, avant d'être posée dans le récipient malaxeur (de type couvercle).



Figure 1.

6. **Humidification et homogénéisation du sol** (Figure 2). Un volume d'eau limité (correspondant à ~5 % du volume total) est ajouté au sol. Ce dernier est alors malaxé à la main, jusqu'à ce que l'eau se soit répartie de manière homogène dans le sol.



Figure 2.

7. **Compactage du sol** (Figure 3). Le sol est progressivement introduit dans le récipient et compacté à la main jusqu'à ce que l'entièreté de la terre remplisse le récipient jusqu'au bord.



Figure 3.

8. **Pesée.** Le récipient contenant la terre humidifiée est pesé pour le calcul de l'humidité volumétrique. Le poids du récipient est retiré.



9. **Insertion du guide** (Figure 4). Un guide est introduit dans le sol pour faciliter l'insertion du capteur.




Figure 4.

10. **Mesure du signal brut** (figure 5). Le capteur est inséré dans le sol et une lecture du signal brut est faite. Prendre garde aux poches d'air : dans ce cas la mesure est biaisée et la valeur du signal brut est trop faible. Si le temps le permet, effectuer plusieurs mesures pour moyenner le signal brut. Pour le 10HS, le lecteur Pro Check a été utilisé. La terre est ensuite retirée et placée dans le récipient malaxeur.



Figure 5.

11. **Obtention des couples de points pour l'étalonnage.** Répéter les points 6 à 10 jusqu'à approcher de la saturation. Idéalement, un minimum de 5 points devrait être obtenu.
12. **Calcul de la courbe d'étalonnage.** Connaissant la masse de terre sèche présente dans le récipient, la masse de terre humide (par pesée) et le volume du récipient, l'humidité volumétrique est connue en parallèle au signal brut. Une relation linéaire ou polynomiale est alors adaptée sur les points et la courbe d'étalonnage obtenue.

<p>Axe Échanges Eau – Sol - Plante</p>  <p>Gembloux Agro-Bio Tech Université de Liège</p> <p>Tél. : 081/62.21.84</p>	<p><b>Nouvelle procédure des mesures de rétention d'eau (Appareil de Richards)</b></p>	<p><b>BIOSE AxeESP LBO02 v 01</b></p> <p>Date d'application : 13/02/2013</p> <p>Auteur : Stéphane Becquevort Relecteur : Prof. Aurore Degré</p> <p>Page 1 sur 10</p>
---	--	--

### Saturation de l'échantillon

La mise en saturation s'effectue en plaçant l'échantillon dans un bac rempli d'eau distillée, d'eau désaérée ou d'une solution de sulfate de calcium de concentration 0,005 mol/l. Le niveau de la solution doit atteindre la mi-hauteur de l'échantillon.

### Préparation des plaques de céramique

Les basses pressions (10 à 1000 hPa) et les hautes pressions (5000 à 15000 hPa) constituent deux circuits différenciés. Des plaques différentes s'y rapportent. Les plaques portant la mention « 1 bar » sont utilisées en basse pression. Les plaques qui portent la mention « 15 bars » sont à utiliser en haute pression.

Les plaques de basse pression doivent être mises à saturation dans de l'eau distillée durant 24 heures avant le démarrage de la mesure.

Les plaques de haute pression doivent être mises à saturation dans de l'eau distillée durant 24 heures avant le démarrage de la mesure.

Quand l'échantillon est saturé, il sera muni d'un couvercle sur son dessus dans le but de limiter l'évaporation et pourra alors rentrer dans la chaîne de mesures pF.

### Démarrage de la mesure

Six échantillons peuvent être mesurés par plaque poreuse. Un échantillon de référence (le témoin) est ajouté. Le témoin est préparé conformément à la procédure BIOSE AxeESP LBO01 v.01.

Pour des échantillons de 10 cm<sup>3</sup>, la mesure porte sur 2 plaques par casserole.

### Etapes de mesure

Les échantillons sont soumis à des pressions croissantes. Les durées de mise à l'équilibre sont renseignées au tableau 1.

Au terme de chaque période de mise à l'équilibre, et pour une raison pratique, le positionnement des échantillons se fait principalement de façon circulaire et lors des pesées, ceux-ci seront pris dans le sens horlogique afin d'éviter des erreurs (figure 1).



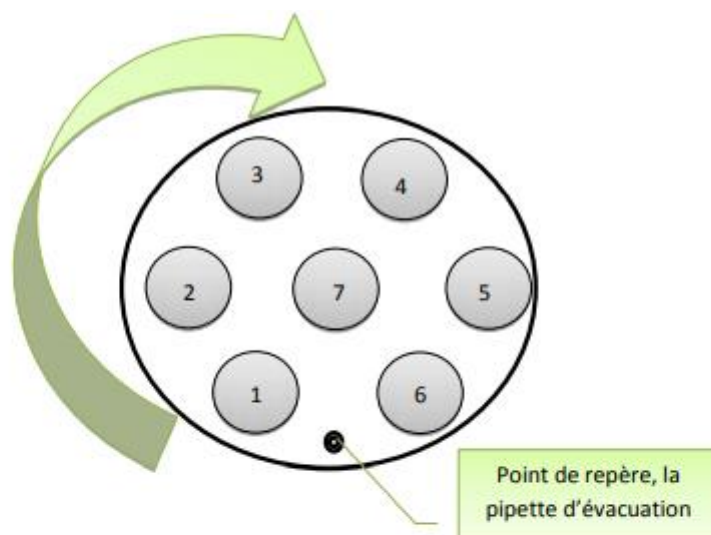


Figure 1 - Positionnement des échantillons sur la plaque

Après la pesée, la manœuvre sera identique mais de manière inverse. Pour une meilleure optimisation, les plaques seront inversées après chaque pesée et humidifiées pour ne laisser qu'une pellicule d'eau.

Chacun des échantillons est pesé au dixième de gramme. Les mesures sont reportées manuellement sur une fiche de laboratoire (document **BIOSE AxeESP LBO02bis v.01**). La plaque en céramique est rincée et abondamment réhumidifiée au moyen d'eau distillée avant que les échantillons y soient replacés.

Au terme du pesage, les plaques et les échantillons sont replacés en casserole selon la procédure (voir paragraphe ci-dessus) et la pression suivante est appliquée.

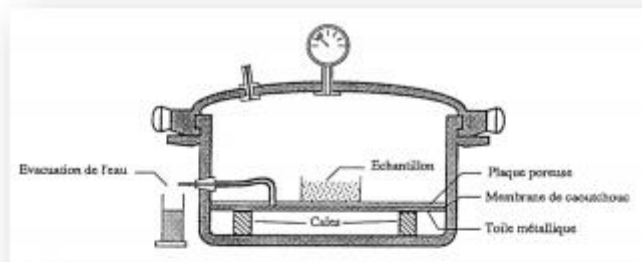


Figure 2 - Schéma théorique d'un appareil de Richards

Tableau 1 – Nombre de jours en fonction des différentes pressions

Pression (hPa)	Nbre de jours
10	min. 03
40	min. 03
70	min. 03
100	min. 03
300	min. 03
700	min. 04
1000	min. 05
5000	min. 10
15000	min. 20

[illegible]

Figure 3 - Exemple de tableau à compléter après chaque pesée

## Réglage de la pression

Le montage est un circuit fermé dans lequel passe de l'air comprimé à une pression de 15000 hPa.



Figure 4 - Montage air comprimé pour Appareil de Richards

### Pour les basses pressions (10 à 1000 hPa)

Pour les mesures allant de 10 à 100 hPa, la pression est réglée par une colonne à eau graduée (voir Figure 2). Pour les pressions entre 100 et 1000 hPa, le réglage est effectué par un détendeur avec lecture au manomètre. Pour passer d'un système à l'autre, une vanne sert de « By-Pass ».

Avant de peser, il est important d'enlever les tuyaux d'évacuation se trouvant à l'extérieur et qui trempent dans des éprouvettes remplies d'eau afin d'éviter un effet d'aspiration et de vider les casseroles contenant de l'air en utilisant la purge (lâcher la pression doucement) tout en ayant fermé le circuit.

Ouvrir le couvercle en dévissant les vis « papillon », en quinconce, retirer les tuyaux connectés à la sortie, et enlever délicatement les plaques. (voir figure 5).

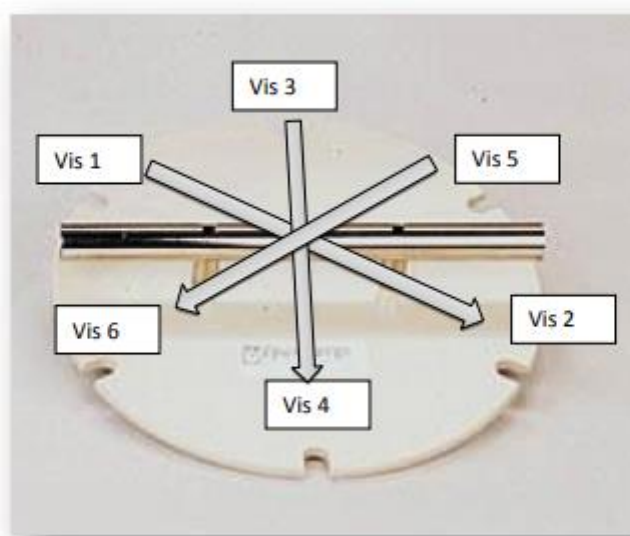


Figure 5 - Méthode de vissage et dévissage



Figure 6 - Plaque 1000 g saturée.

Avant la pesée, les échantillons seront déposés sur une plaque intermédiaire en gardant leur configuration.

Pour une raison pratique, le positionnement des échantillons se fait principalement de façon circulaire et lors des pesées, ceux-ci seront pris dans le sens horlogique afin d'éviter des erreurs.

Après la pesée, la manœuvre sera identique mais de manière inverse. Pour une meilleure optimisation, les plaques seront inversées après chaque pesée et humidifiées pour ne laisser qu'une pellicule d'eau.



Tuyau connecté  
à la sortie

Figure 7 - Positionnement des échantillons dans appareil de Richards



Figure 8 - Balance avec échantillon

### Pour les hautes pressions

Le procédé est identique mais le système de fermeture des casseroles est différent. Dans ce cas-ci, le système de fermeture se fait à l'aide de boulons, donc il faut se munir d'une clé ainsi que d'une clé à douilles. Pour une question pratique lors de l'ouverture avec les clés, veillez toujours à maintenir la casserole par la poignée afin que le système ne se détériore pas. Le desserrage de ces boulons, s'effectuera tout comme en basse pression (en quinconce) (voir figure 5). Afin que l'air circule entre les plaques, des blocs de plexiglas sont placés sous les plaques.

Arrivé à l'équilibre, la procédure de pesage se fait de manière identique qu'en basse pression. Lors du remontage des appareils, veillez à replacer correctement le joint en caoutchouc et même le nettoyer avec un chiffon humide.

### **Mise à l'étuve**

Au terme de la dernière pesée, enlever les élastiques et disposer les échantillons dans une coupelle soit en verre, soit en fer. Peser l'élastique et reporter la mesure sur le document **BIOSE AxeESP LBO02bis v.01**.

L'échantillon dans sa coupelle est mis à l'étuve à une température de 105°C. Pour actionner l'étuve, il faut enclencher les interrupteurs muraux en appuyant sur le bouton vert et démarrer celle-ci en appuyant sur le bouton POWER pendant quelques secondes ; la température se stabilisera automatiquement. Refermer les portes des étuves. Le temps de séchage dépendra de la nature de l'échantillon.

Quand le temps de séchage est terminé, peser l'échantillon brut et puis chaque élément le composant : l'anneau, l'étamine, la coupelle et reporter ces mesures sur le document **Biose AxeESP LBO03 v. 01**.



Annexe 11 : Température du sol des buttes le 5 mars 2021. La température moyenne pour chaque type de butte est indiquée par un losange rouge.

