

# Influence des pratiques de la Ferme du Bec Hellouin sur la fertilité et la matière organique du sol

---

Auteurs : Valentin Sohy, Félix de Tombeur, Jean-Thomas Cornélis.

Rédigé en novembre 2017



# Remerciements aux partenaires de l'Institut Sylva

## Partenaires financiers :

- Fondation de France
- Fondation Iris
- Fondation Lemarchand pour l'Équilibre entre les Hommes et la Terre
- Fondation Lunt
- Fondation Picard
- Fondation Terra Symbiosis
- Mairie de Paris
- Mécénat BALT-NEWCO
- Mécénat Charlotte de Mévius
- Mécénat Gilles Ghesquière
- Ecole de Permaculture du Bec Hellouin

## Partenariats scientifiques et techniques :

- Unité SAD-APT - INRA AgroParisTech
- Ferme biologique du Bec Hellouin
- Laboratoire d'Analyses Microbiologiques des Sols (LAMS)
- Université Libre de Bruxelles (ULB)
- Ligue pour la Protection des Oiseaux (LPO)
- Carbone 4
- Université de Gembloux
- Pur Projet
- Ecocert
- Groupe de Recherche en Agriculture Biologique (GRAB)
- Chambre Régionale d'Agriculture de Normandie (CRAN)
- Association Française d'Agroforesterie (AFA)
- Agroforestry Research Trust
- Actes Sud

Merci infiniment pour leur soutien et leurs contributions aux programmes de recherches  
de l'Institut Sylva.

## Sommaire

I. Préambule.....	4
II. Introduction .....	4
III. L'étude .....	7
Parcelles étudiées .....	8
Parcelles de la ferme du Bec Hellouin .....	8
<i>Parcelle « Pâture »</i> .....	9
<i>Parcelle « Conventionnel »</i> .....	10
IV. Analyses, résultats et discussion .....	10
V. Conclusion.....	18

## I. Préambule

Ce rapport est inspiré de la thèse de fin d'étude (TFE) de Valentin Sohy intitulé « Etude des aspects quantitatifs et qualitatifs de l'influence de pratiques de maraîchage bio-intensif sur la dynamique de la matière organique du sol ». Le but de ce rapport est de rendre plus lisibles, plus accessibles pour grand public, les résultats les plus intéressants de ce TFE. Pour ceux qui voudraient aller plus loin, le TFE en question est disponible en ligne sur la plateforme MATHEO à l'adresse suivante : <https://matheo.ulg.ac.be/handle/2268.2/3048>. Le présent rapport est toutefois amplement suffisant pour comprendre l'essence du message que cette étude a permis de mettre en évidence.

## II. Introduction

“The maintenance of the fertility of the soil is the first condition of any permanent system in agriculture. In the ordinary processes of crop production fertility is steadily lost: its continuous restoration by means of manuring and soil management is therefore imperative”.

Sir Albert Howard, *An agricultural testament*, Oxford City Press, 2010, p.5.

Le courant « industriel », voire conventionnel, de l'agronomie a depuis longtemps eu tendance à réduire le sol à un support matériel. Le sol ne serait alors « qu'un » milieu poreux destiné à recevoir les engrais minéraux provenant de l'industrie minière et pétrolière, engrais solubles directement assimilables par les racines des plantes que l'on veut faire pousser. Selon cette vision, l'essentiel de la gestion des sols se résumerait donc, en toute logique, en le maintien d'une bonne porosité, d'une bonne structure physique, par le labour par exemple. Par ailleurs, la physiologie végétale et la chimie, deux disciplines-piliers de l'agronomie industrielle, nous ont appris que la disponibilité des nutriments pour les plantes dépend du pH (l'acidité) des sols et qu'elle est, de manière générale, plus importante dans les pH proches de la neutralité (pH = 7). Par conséquent, les sols trop acides sont chaulés afin d'atteindre la neutralité. Labour, chaulage et engrais de synthèse, ceci résume de manière simplifiée et légèrement caricaturale le mode de gestion des sols dans la plupart des exploitations agricoles de nos régions industrialisées.

Cette vision simpliste et les pratiques qu'elle entraîne ont conduit à la dégradation de la majorité des sols agricoles. Selon la FAO (FAO et ITPS, *État des Ressources en Sol dans le Monde – Résumé technique*, Rome, 2015, p.VIII), les menaces les plus importantes qui pèsent sur les sols à l'échelle mondiale sont l'érosion, la perte en carbone organique et le déséquilibre des éléments nutritifs. Ce même rapport avance que la situation ira en s'empirant si des mesures concertées ne sont pas prises par les particuliers, le secteur privé, les gouvernements et les organisations internationales.

## Pourquoi prendre soin du sol ?

Le sol est une ressource précieuse, il rend de nombreux **services écosystémiques** à l'humanité. Outre le fait que le sol est effectivement un support physique qui permet à la biomasse terrestre de pousser tout en lui **délivrant des nutriments** et en **conservant l'eau** lors des périodes sèches, il constitue également un filtre vis-à-vis de certains polluants tels que les métaux lourds et les pesticides, ainsi il **améliore la qualité de l'eau** des nappes phréatiques et de surface. Par ailleurs, il **abrite et nourrit une extraordinaire diversité d'organismes vivants**. On estime que plus d'un milliard de bactéries, d'un million d'espèces différentes, ainsi que plus d'un million de champignons de plus de 10 000 espèces différentes peuvent coexister dans un 1 g de sol. Cette réserve immense de biodiversité est également un service écosystémique important. De plus, **les sols représentent le plus grand réservoir de carbone après les océans**. On estime que la quantité totale de C dans les sols à l'heure actuelle est de 2 500 Pg (un million de milliards) dont 1 550 Pg sous forme organique (inclus dans les matières organiques du sol). Cela représente 3,3 fois la quantité de CO<sub>2</sub> présente dans l'atmosphère en 2004 (760 Pg) et 4,5 fois la quantité présente dans la biomasse en 2004 (560 Pg). En cela, le sol présente un fort potentiel de séquestration du carbone atmosphérique et donc de mitigation du changement climatique. C'est de ce constat qu'est née l'initiative « 4 pour 1000 » élaborée par des chercheurs de l'INRA à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle et selon laquelle une augmentation annuelle de 4 pour mille du stock global de carbone organique des sols stabiliserait les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. *A contrario*, le sol représente également une source potentielle de gaz à effet de serre importante s'il perd le carbone organique qu'il contient par la minéralisation de celui-ci.

Le sol est une ressource limitée et très peu, voire pas, renouvelable. En moyenne, on considère que 0,1 mm de sol se forme chaque année. Dès lors, même de très faible taux d'érosion peuvent conduire à une diminution de la profondeur des sols. On estime qu'à l'heure actuelle et dans nos régions, les taux d'érosion sont de 100 à 1 000 fois supérieurs au rythme naturel de formation des sols. Cela est dû à l'absence de couverture végétale à certains moments de l'année. Le sol est alors exposé aux intempéries et il est importé dans les cours d'eau par le ruissellement de l'eau de pluie. C'est également dû à la destruction de la structure du sol causée par la diminution des concentrations en matières organiques du sol. En effet, ces matières organiques jouent le rôle de liants entre les particules, améliorent la structure du sol, forment sa porosité. Ainsi, un sol présentant des teneurs en matière organique importantes aura moins tendance à former une croûte de battance et sera par conséquent moins sensible à l'érosion. La matière organique du sol est également source de nutriments pour les plantes et pour les micro-organismes, elle constitue les habitats de ces derniers, elle participe au pouvoir filtrant du sol. On voit donc que cette matière organique, associée à la matrice minérale, joue un rôle central dans les fonctions du sol et pour la stabilité de celui-ci. Il est malheureusement observé que les teneurs en matières organiques des sols diminuent depuis de nombreuses années dans les sols agricoles et atteignent maintenant des niveaux inquiétants dans plusieurs régions. Il est donc primordial et urgent de comprendre l'influence des pratiques agricoles sur la dynamique des matières organiques du sol.

## La matière organique du sol

La matière organique présente dans le sol provient de la décomposition, des déjections et des exsudats des plantes, animaux et micro-organismes. Plusieurs communautés d'organismes décomposeurs se succèdent pour dégrader la matière organique en particules de plus en plus petites jusqu'à devenir des nutriments ou être libérée dans l'atmosphère sous forme gazeuse (ex :  $CO_2$ ). Cependant, à partir d'une taille suffisamment petite, les molécules organiques deviennent assez réactives pour entrer en interaction avec la phase minérale du sol. On parlera de processus d'adsorption, c'est-à-dire des liaisons chimiques ou électrostatiques entre les minéraux et les molécules organiques, les fameuses liaisons organo-minérales (encore souvent appelées argilo-humiques).

Les molécules adsorbées sont dites « **protégées chimiquement** ». En effet, les molécules ainsi protégées ne vont plus subir les processus de dégradations par la pédofaune et les micro-organismes. C'est ainsi que les matières organiques, et donc le carbone, peuvent être séquestrés dans le sol pendant plusieurs décennies, siècles, voire millénaires !

Un autre type de protection des matières organiques intervient lorsque les matières organiques sont incluses dans les agrégats. Les agrégats sont des assemblages de particules de sol peu ordonnés, formés par de multiples liaisons entre les minéraux et les matières organiques ainsi que par des polymères d'origine microbienne (polysaccharides), des mycorhizes ou racines. Au sein des agrégats, les pores sont suffisamment petits pour limiter la diffusion de l'oxygène et le passage de certains organismes, ce qui ralentira, voire empêchera, la décomposition des matières organiques. On dira alors qu'elles sont « **protégées physiquement** ».

Cette protection physique des matières organiques est particulièrement sensible aux conditions environnementales et donc aux pratiques agricoles, au mode de gestion du sol. L'étude de cette sensibilité a permis de mettre en évidence l'existence de deux « types » d'agrégats. Les **macroagrégats** qui mesurent plus de  $250 \mu m$  ( $10^{-6} m$ ), qui sont très sensibles aux perturbations environnementales et qui n'ont pas une influence directe très importante sur la protection physique des matières organiques. Les **microagrégats** qui mesurent entre  $50$  et  $250 \mu m$ , qui sont moins sensibles aux perturbations environnementales et qui ont une influence plus importante sur la protection physique des matières organiques. De plus, il a été observé qu'une partie des microagrégats était produite au sein même des macroagrégats, on parlera alors de **microagrégats protégés** (présents dans les macroagrégats), en opposition aux **microagrégats libres** (non présent dans les macroagrégats). Cette production de microagrégats au sein des macroagrégats se fera à condition que le turnover ( $\approx$  durée de vie) des macroagrégats soit suffisamment lent. Toutes les perturbations/pratiques qui auront tendance à accélérer le turnover (à diminuer le temps de vie) des macroagrégats diminueront la production de microagrégats et donc la protection physique des matières organiques.

### Influence des pratiques sur la protection physique des matières organiques

L'étude de l'influence des pratiques agricoles sur la dynamique des matières organiques a montré que certaines de ces pratiques ont tendance à détruire les agrégats du sol. Il a été montré que le labour, en exposant le sol aux aléas climatiques, augmente l'amplitude des températures et de l'humidité, augmente le taux de décomposition de la matière organique en modifiant les conditions

microclimatiques du sol, affecte les communautés microbiennes et diminue la prolifération des hyphes mycéliens qui contribuent à la formation et à la stabilité des macroagrégats. Dès lors, le labour aura tendance à diminuer la protection physique des matières organiques du sol (en augmentant le turn-over des macroagrégats) et diminuera les stocks de matière organique.

Les plantes ont besoin de nutriments pour pousser. Dans les sols cultivés, des quantités importantes de nutriments sont exportés du système sol-plante via les récoltes. Il est donc souvent nécessaire de ramener des nutriments au sol afin que celui-ci ne s'appauvrisse pas. Ces apports peuvent être faits sous forme minérale, provenant de roches riches en ces nutriments ou de procédés industriels tels que le procédé Haber pour les engrais azotés. Ils peuvent également être faits sous forme organique par apports d'engrais animaux (lisier, fumier, ...) ou végétaux (résidus de culture, purins, ...). L'apport d'engrais exclusivement sous forme minérale diminuerait le développement des hyphes mycéliens et aurait, par conséquent, une influence négative sur l'agrégation dans le sol et donc sur la protection physique des matières organiques.

Face au constat de la diminution des teneurs en matière organique dans les sols, plusieurs pratiques bénéfiques pour ces stocks ont été mises en évidence. Ces pratiques ont en commun soit d'augmenter les apports de matière organique fraîche (agroforesterie, couverts végétaux, utilisation d'engrais organiques...), soit de diminuer les perturbations du sol (couverture végétale, non-labour, prairies temporaires...).

La ferme Biologique du Bec Hellouin fonctionne selon un système de gestion qui s'inspire de la permaculture et du maraîchage bio-intensif. En très bref, cela se traduit :

- par l'utilisation presque exclusive et importante d'engrais organiques (résidus de culture, fumier de cheval...),
- par une protection du sol importante et quasi permanente (paillages, cultures denses...),
- par une densité de culture ainsi qu'un nombre de rotations annuelles importants (cultures relais, associations de cultures, stratification verticale des cultures...).

Dès lors, les pratiques mises au point à la ferme du Bec Hellouin respectent plusieurs des principes qui induisent une augmentation de la protection des matières organiques dans le sol et donc des stocks. D'une certaine manière, les pratiques qui y sont mises en œuvre sont extrêmes dans l'application de ces principes. En effet, c'est une agriculture spatialement très intensive et il est difficile d'imaginer un système de gestion qui densifierait plus encore la production et les soins apportés (temps de travail/m<sup>2</sup> cultivé) aux surfaces cultivées. L'étude de cette ferme permet donc de donner des indications sur : **« jusqu'où », dans un sol cultivé, est-il possible d'augmenter les stocks de matière organique et sous quelles formes ?**

### III. L'étude

Afin d'étudier l'influence des pratiques de la ferme du Bec Hellouin sur la dynamique des matières organiques et, par la même occasion, sur la fertilité des parcelles cultivées, plusieurs échantillons de sol ont donc été prélevés. La ferme est constituée de plusieurs « jardins », qui sont des unités de

production relativement homogènes. Les jardins de la ferme n'ont cependant pas tous été étudiés pour des raisons logistiques et par souci de fiabilité des résultats.

Selon les principes du « zonage permaculturel », la ferme est divisée en plusieurs zones numérotées de 0, la zone la plus centrale où on est présent le plus souvent, l'atelier à outils dans ce cas, à 5, la zone la plus excentrée laissée à elle-même et ne demandant pas d'intervention humaine, la forêt environnante pour la ferme du Bec Hellouin. Cette notion de zone est intéressante car elle est indicatrice de l'intensité des soins prodigués aux parcelles ou, en d'autres termes, du temps de travail par unité de surface cultivé. Afin de pouvoir observer l'influence de l'intensité de ces soins sur l'état du sol, les échantillons ont été prélevés dans des zones différentes.

Pour évaluer au mieux les effets de ces pratiques, les sols de la ferme du Bec Hellouin ont été comparés à une pâture située à quelques dizaines de mètres des parcelles de la ferme et à une parcelle en agriculture conventionnelle située à environ 2 km de la ferme, dans des conditions environnementales et pédologiques relativement similaires.

L'échantillonnage a été réalisé sur les 20 premiers centimètres de sol. Il a été effectué les 29 et 30 juillet 2016. Trois échantillons ont été prélevés sur chaque parcelle. Ces prélèvements de sol ont été faits de manière à représenter le plus fidèlement possible les variations pouvant exister au sein de chaque parcelle.

## Parcelles étudiées

### Parcelles de la ferme du Bec Hellouin

#### *Parcelle « Planche plate »*

Au sein de la ferme, ce jardin est appelé « Pommiers ». Il est constitué de 8 planches plates permanentes. Les planches plates permanentes sont des surfaces rectangulaires cultivées de 80 cm de large sur une vingtaine de mètres de long. Elles sont planes et légèrement surélevées par rapport aux allées adjacentes. Le sol y est aéré par une sorte de grelinette améliorée (la Campagnole) ou décompacté en surface entre chaque culture ou apport de compost.

Ces planches plates sont situées dans la **zone 1**. Dès lors, elles reçoivent une attention soutenue qui permet une intensification importante. La densité de plantation y est élevée, jusqu'à 1 rang tous les 6,5 cm, voire 2 rangs tous les 6,5 cm dans le cas de cultures associées. Les associations de cultures y sont fréquentes (ex : radis-carottes-fèves ; navets-panais-fèves ; carottes-poireaux ; etc.).

Cette parcelle fait partie des parcelles les plus intensément travaillées (1,48 h de travail/m<sup>2</sup> cultivé selon Guégan et Léger (2015)). C'est également la parcelle étudiée qui reçoit la quantité de matière organique fraîche (compost, fumier, résidus de culture, etc.) la plus importante. En 2016, des quantités importantes de fumier de cheval y ont été apportées. Au total, la partie échantillonnée de cette parcelle a reçu environ 58 kg de MO fraîche par m<sup>2</sup> cultivé lors de cette année. Environ 10 cm de vieux fumier de cheval composté avaient également été appliqués à sa création en 2012. En dehors de ces 2 années au cours desquelles les apports furent particulièrement importants, les apports sont estimés à 5 à 10 kg par m<sup>2</sup> cultivé et par an.



### *Parcelle « Butte »*

Au sein de la ferme, ce jardin est appelé « Grande-île » car il a la particularité d'être installé sur une île artificielle (au milieu d'une mare).

Les buttes sont des monticules allongés de 0,8 m à 1,20 m de large et d'une dizaine de mètres de long (pas forcément rectilignes). Elles font de 30 à 50 cm de haut (la hauteur varie au fil du temps) et sont fréquemment recouvertes d'un paillage (plus de la moitié de l'année).

Les buttes font également partie de la **zone 1**, elles reçoivent une attention particulière. Les densités y sont un peu moins importantes que sur les planches plates mais l'association de cultures y est également de mise (choux-fèves-salade ; ails-mâches ; haricots-épinards). L'apport en matière organique y est important bien que moins intense que sur les planches plates. Environ 51 kg de MO/m<sup>2</sup> cultivé ont été apportés en 2016. Environ 10 cm de vieux fumier de cheval composté avaient également été appliqués à sa création en 2009. En dehors de ces 2 années, les apports de matière organique se résument à des paillages importants et réguliers en quantités indéterminées et à des apports de compost minimes et occasionnels.

### *Parcelle « Forêt-Jardin »*

La forêt-jardin est située dans la **zone 3**, elle est donc l'objet de relativement peu de soins. Implantée en 2009 et d'une superficie de 1 160 m<sup>2</sup>, c'est un système cultural qui tend vers l'autonomie (c'est-à-dire le moins d'interventions extérieures possible). Dès lors, le temps de travail par unité de surface est beaucoup moins important (chiffres non disponibles). Le seul apport important que cette parcelle ait reçu est une couche de 10 cm d'épaisseur de vieux fumier de cheval composté lors de la mise en place de la parcelle.

La forêt-jardin est composée d'une petite dizaine d'îlots cultivés en strates verticales. La strate arborée est clairsemée et composée de quelques arbres (pommiers, sureaux, poiriers, cornouillers sanguins, etc.). La strate arbustive est la plus développée et la plus dense (groseilliers, framboisiers, cassis, noisetiers, etc.). La strate grimpante comprend quelques mûres sans épines. La strate herbacée est principalement spontanée et largement représentée par la consoude et l'ortie.

### *Parcelle « Pâture »*

Le pâturage est une parcelle appartenant à la ferme du Bec Hellouin également. Cependant, le mode de gestion de celle-ci relève d'un pastoralisme, certes peu intensif, mais somme toute assez conventionnel. C'est pourquoi, dans la présentation des résultats (graphes), cette parcelle ne sera pas présentée comme extérieure à la ferme. Sur une surface totale de 3,4 ha, une vingtaine de moutons y pâturent de mars à novembre ainsi qu'un cheval et un âne. Aucun apport particulier n'a été effectué sur ce pâturage depuis le lancement de la ferme du Bec Hellouin. Le Bec (ruisseau) passe dans son canal en bordure du pâturage. Entre le Bec et la pâture s'élève une rangée d'arbres (merisiers, aubépines et saules). L'échantillonnage a été effectué à des distances entre 10 et 30 m du ruisseau.

L'intérêt de la pâture est qu'elle est représentative de la situation des parcelles de la ferme avant leur mise en culture : les surfaces cultivées de la ferme du Bec Hellouin étaient le prolongement de ce pâturage.

### Parcelle « Conventiennel »

Cette parcelle est gérée selon des pratiques agricoles assez intensives orientées vers la production de céréales et de protéagineux (blé tendre, orge, colza, pois, etc.). La rotation qui s’y effectue le plus souvent est la rotation triennale blé/pois/blé. L’échantillonnage de cette parcelle s’est fait lors de la troisième année de rotation (sous culture de blé donc). Le sol est labouré entre chaque culture selon un labour peu profond. La fertilisation est minérale. L’utilisation de pesticides est courante, notamment des fongicides sur les cultures de blé (3 passages par saison).

## IV. Analyses, résultats et discussion

### Les éléments biodisponibles

Un des grands objectifs de cette étude était de vérifier que les pratiques de la ferme du Bec Hellouin induisent une fertilité des sols suffisante pour permettre aux cultures de pousser correctement. Un des moyens d’évaluer cette fertilité est la quantification des « éléments biodisponibles », c’est-à-dire des éléments disponibles pour le vivant (cultures, micro-organismes...). Les éléments biodisponibles quantifiés sont le phosphore, le potassium, le magnésium et le calcium. Chacun de ces éléments est indispensable au bon fonctionnement des plantes.

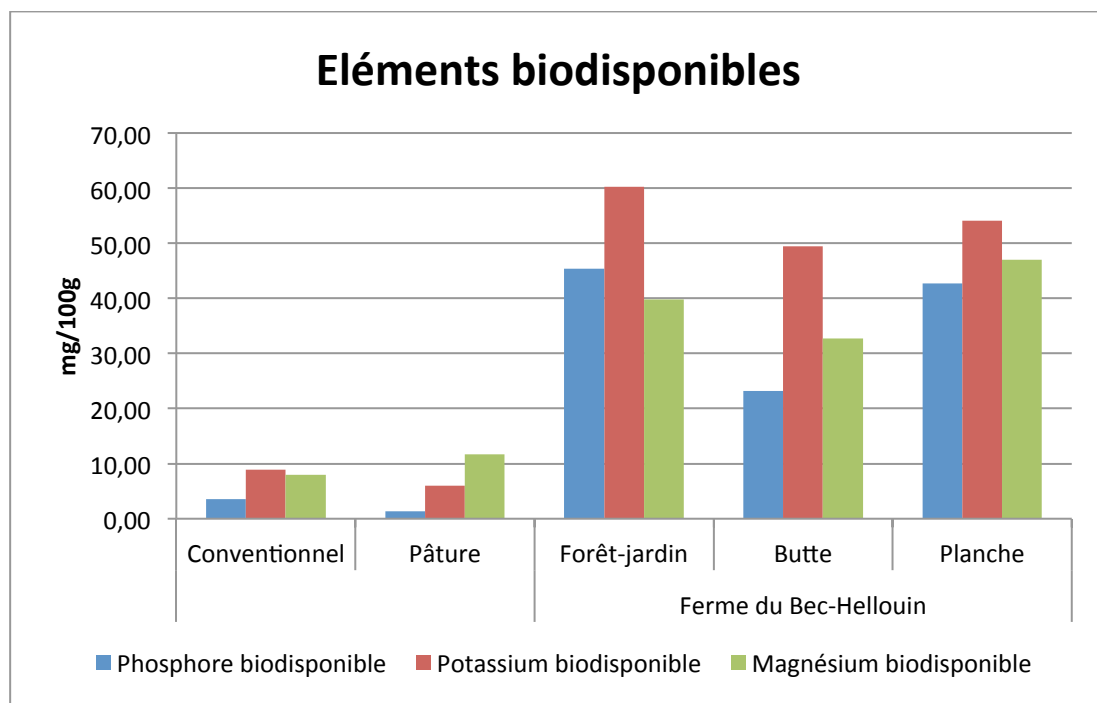


Figure 1 - Moyennes des quantités de phosphore, de potassium et de magnésium biodisponibles mesurées.

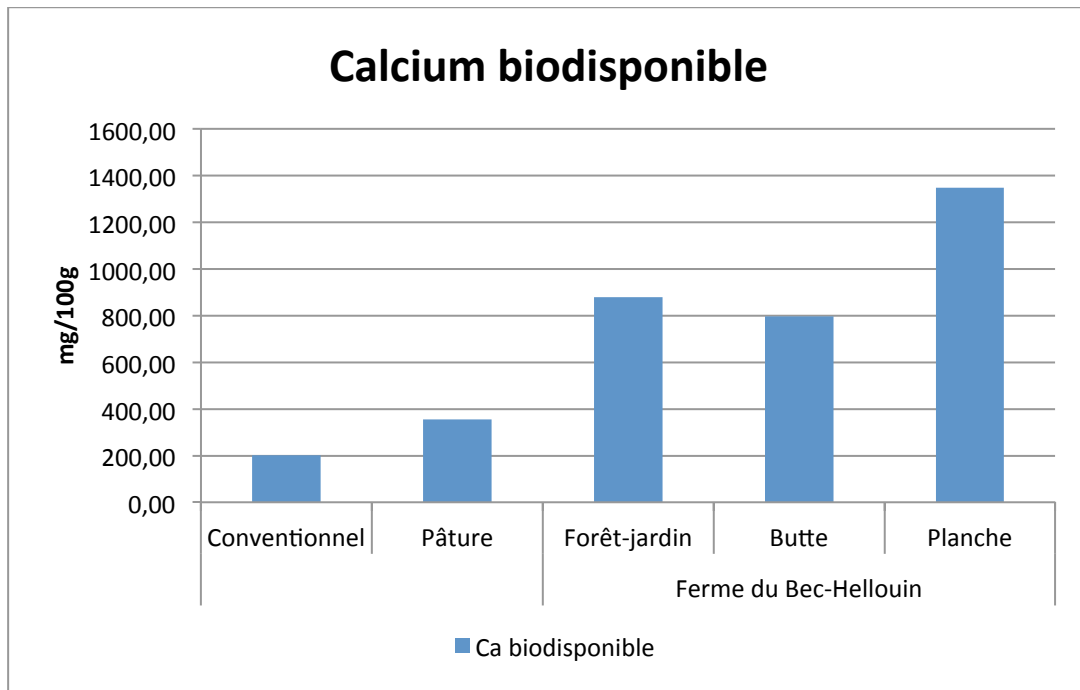


Figure 2 - Moyenne des quantités de calcium biodisponible mesurées.

Les tableaux ci-dessus montrent que, de manière générale, la quantité d'éléments biodisponibles est beaucoup plus importante dans les parcelles de la ferme du Bec Hellouin que dans la pâture et la parcelle en agriculture conventionnelle. Les quantités mesurées dans les sols de la parcelle en agriculture conventionnelle sont quant à elles assez similaires à celles de la pâture.

Cette différence très claire entre les quantités d'éléments biodisponibles dans les sols de la ferme du Bec Hellouin et les autres sols vient en partie du fait que ceux-ci reçoivent ou ont reçu des quantités importantes de matières organiques qui, en se décomposant, libèrent ces nutriments. Si l'on garde à l'esprit que les sols de la ferme du Bec Hellouin étaient semblables à la pâture avant leur mise en culture, on voit que **la gestion des résidus de culture et l'apport de matières organiques locales montrent donc un fort potentiel de fertilisation des sols.**

Cependant, si cela n'était dû qu'aux apports, la parcelle butte afficherait systématiquement des valeurs plus élevées que la forêt-jardin puisqu'elle reçoit des quantités de matière organique beaucoup plus importantes. On peut supposer que la quantité d'un élément biodisponible présent dans le sol dépend de la balance de cet élément au sein de celui-ci. C'est-à-dire de la différence entre les apports (inputs) et les exports (outputs). Le schéma ci-dessous résume les différents processus qui influencent cette balance.

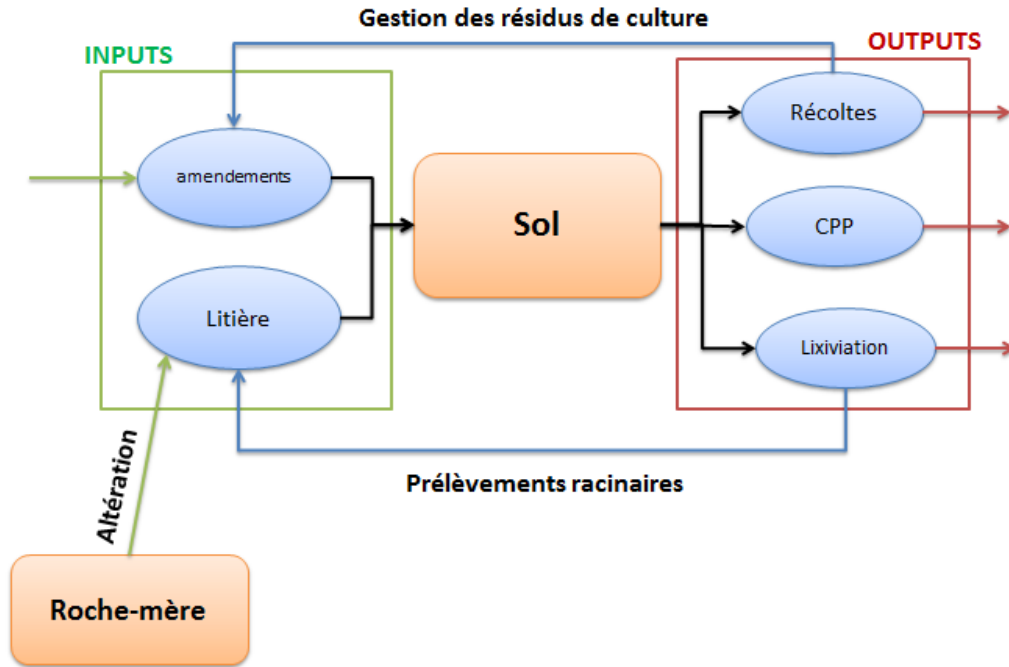


Figure 3 - Processus principaux influençant la balance des éléments au sein du sol. CPP = croissance des plantes pérennes.

Dans le cas de la forêt-jardin les récoltes ne sont pas importantes, beaucoup moins intensives que dans les 2 autres parcelles de la ferme du Bec Hellouin. De plus, la lixiviation (lessivage des éléments sous forme dissoute) est certainement réduite par la protection constante du sol grâce à la litière et grâce aux prélèvements importants et en profondeur des arbres, arbustes, plantes herbacées et autres. La croissance des plantes pérennes ne doit pas influencer énormément la balance étant donné que les arbres et arbustes sont déjà de taille mûre ou presque. Les exports sont donc globalement limités, au contraire des deux autres parcelles de la ferme du Bec Hellouin où les récoltes sont très importantes par unité de surface cultivée. Les apports se résument, quant à eux, aux retours d'éléments dans la litière via la chute des feuilles ainsi que via les exsudats et la dégradation des racines et à l'apport important qui avait été fait à la création de la forêt-jardin. Ils sont donc limités également mais suffisants pour que la balance des éléments soit positive (qu'il y ait plus d'apports que d'exports). Ce qui conduit les sols de la forêt-jardin à des teneurs en éléments biodisponibles plus importants que la parcelle butte, malgré les apports de matière organique importants que celle-ci reçoit.

### La capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique (CEC) représente le potentiel d'un sol à stocker des éléments nutritifs chargés positivement (les cations tels que le Ca, le Mg, le K et le Na) sur le complexe d'échange, c'est-à-dire la fraction de sol la plus en interaction avec l'environnement (surface des minéraux et des matières organiques associées aux minéraux). Si on compare le complexe d'échange à un frigo, la CEC est la taille de ce frigo. Plus la CEC sera grande, plus le sol pourra contenir de nutriments. Les études réalisées sur la CEC ont montré qu'elle est proportionnelle aux teneurs en argile des sols ainsi qu'aux teneurs en matière organique.

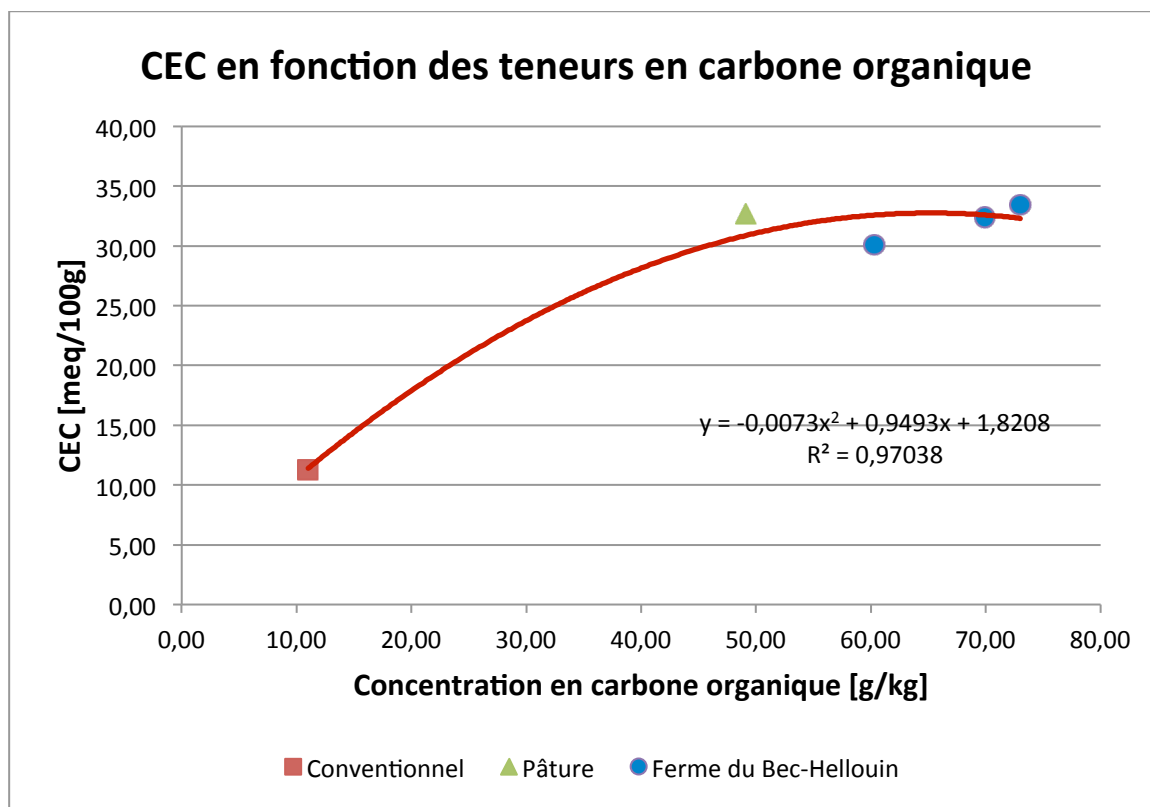


Figure 4 – Le carré rouge représente les valeurs moyennes de la parcelle en conventionnel, le triangle vert représente les valeurs moyennes de la pâture et les ronds bleus représentent les valeurs moyennes des parcelles de la ferme du Bec Hellouin. La ligne rouge est une régression polynomiale de degré deux réalisée sur l'ensemble de ces points.

Dans le cadre de cette étude, aucune corrélation entre la teneur en argile et la CEC n'a pu être mise en évidence. Par contre, le graphique ci-dessus montre bien l'influence des quantités de carbone organique (et donc de la matière organique) sur les valeurs de la CEC. La matière organique semble jouer un rôle plus important que les argiles dans le fonctionnement du sol.

### Taux de saturation en base

Au fur et à mesure qu'un sol s'altère et s'acidifie, les nutriments (Ca, Mg, K et Na) contenus sur le complexe d'échange (le frigo) sont remplacés par des ions acides protons ( $H^+$ ) et aluminium ( $Al^{3+}$ ). Le taux de saturation en bases exprime quant à lui le pourcentage du complexe d'échange qui est occupé par des bases (et donc pas par des ions acides). On peut comparer ce taux de saturation en bases au niveau de remplissage du frigo.

Le taux de saturation en bases des 3 parcelles de la ferme du Bec Hellouin est de 100%. Ce qui signifie que le complexe d'échange est saturé en bases (que le frigo est plein). Celui de la parcelle en agriculture conventionnelle est de 95% tandis que celui de la pâture est de 90%. Toutes les parcelles présentent donc un taux de remplissage assez élevé. Cela est dû à la présence importante de calcium qui est libéré lors de l'altération des minéraux riches en cet élément (roche-mère carbonatée). Si la pâture présente des valeurs de taux de saturation en bases moindres, c'est certainement dû à l'absence d'apport d'engrais, minéraux ou organiques, qui remplissent le complexe d'échange lors de leur application.

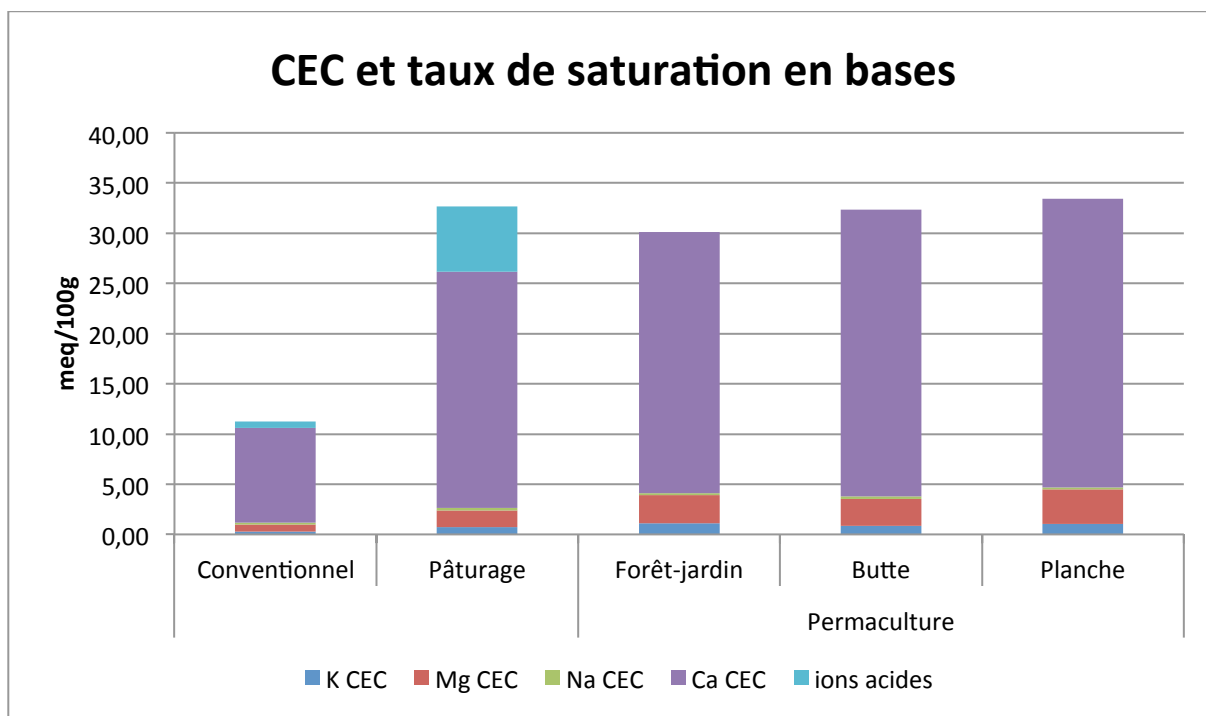


Figure 5 - La hauteur totale des barres représente la valeur de la CEC. La quantité de nutriments présente dans le complexe d'échange (dans le frigo) est égale à la hauteur totale des barres moins le bleu clair (ions acides). Le taux de saturation en bases est le ratio entre la quantité de nutriments divisée par la CEC. K=Potassium (bleu) ; Mg=Magnésium (rouge) ; Na=Sodium (vert) ; Ca=Calcium (mauve).

Le tableau ci-dessus donne la valeur de la CEC (hauteur totale de la colonne) et la nature des éléments qui remplissent le complexe d'échange. On voit que la parcelle en agriculture conventionnelle présente un taux de saturation en bases (K, Mg, Na et Ca) important (le frigo est rempli) mais une CEC beaucoup moins importante que dans les autres parcelles (le frigo est petit). Ce dernier point est dû aux concentrations en carbone organique (matière organique) beaucoup moins importantes dans cette parcelle que dans les autres (voir plus bas). On voit également que la quasi-totalité du complexe d'échange est occupé par du calcium ( $Ca^{2+}$ ). Il est courant de rencontrer des situations semblables dans les sols non acidifiés.

#### La quantité de carbone organique

Afin de pouvoir comparer les stocks de carbone organique dans les sols, il est nécessaire de calculer la densité des sols échantillonnés. En effet, les mesures des concentrations en carbone organique donnent les quantités par unité de masse du sol. Pour estimer les stocks de carbone organique dans un sol, il faut donc connaître la masse du sol dans la profondeur échantillonnée. Le calcul de cette densité apparente doit également exclure la charge caillouteuse qui n'intervient pas dans le stockage du carbone. Une fois les densités calculées, il suffit de multiplier celles-ci par les concentrations en carbone organique pour obtenir les stocks.

Comme on pouvait le supposer avant les mesures, les pratiques de la ferme du Bec Hellouin favorisent bel et bien le stockage de carbone organique dans les sols. L'histogramme ci-dessous montre les valeurs de ces stocks calculées pour les 10 premiers centimètres des sols échantillonnés.

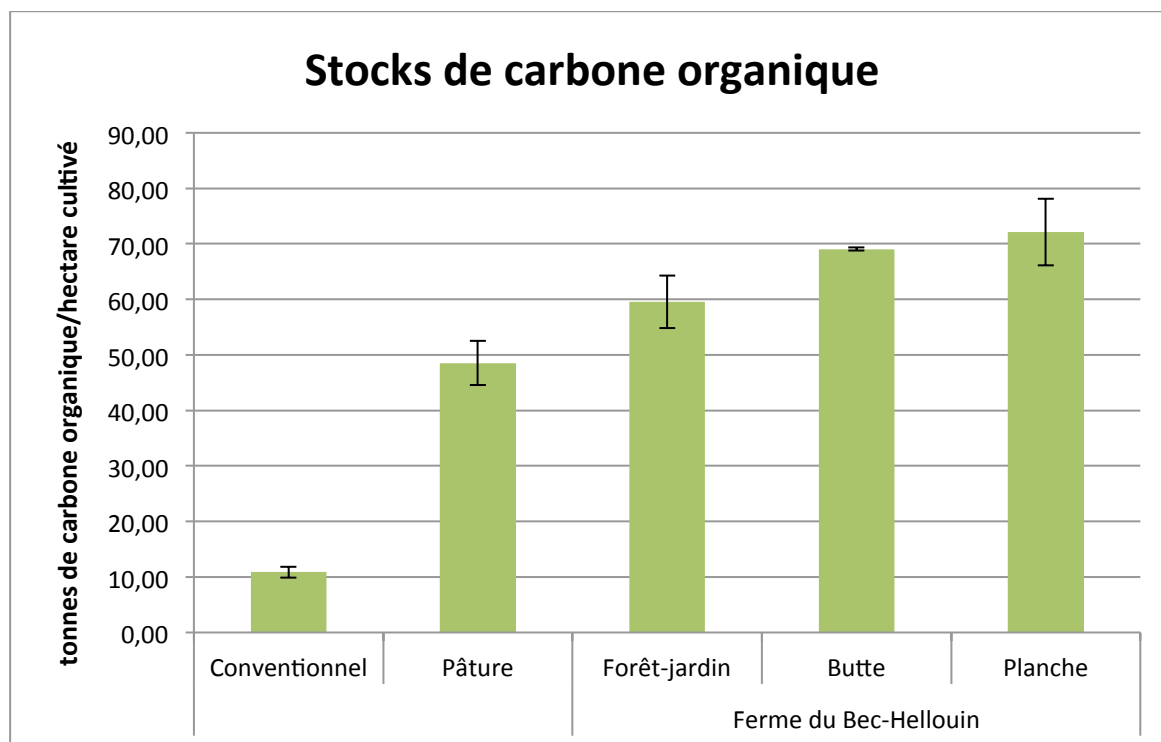


Figure 6 - Les barres vertes représentent les valeurs moyennes des stocks de carbone organique présents dans le sol des parcelles étudiées. Les intervalles noirs représentent les intervalles de confiance de ces moyennes.

On voit que le stock de la parcelle en agriculture conventionnelle est nettement inférieur aux stocks des autres parcelles (avec une valeur plus de 5 fois inférieure à toutes les parcelles de la ferme du Bec Hellouin). De plus, le stock de la pâture est également inférieur aux stocks des parcelles de la ferme du Bec Hellouin. Cela est plus étonnant étant donné que la littérature scientifique a tendance à montrer que le passage du milieu naturel (forêt ou pâture) à des surfaces cultivées s'accompagne d'une diminution des stocks de carbone organique. En considérant que les parcelles de la ferme du Bec Hellouin étaient à l'état de pâture avant leur mise en culture, les pratiques de la ferme ont donc entraîné une accumulation du carbone organique, contrairement à la tendance générale des sols cultivés.

En prenant en compte l'année de mise en culture de chacune des parcelles de la ferme, on peut calculer les taux de stockage de celles-ci. La forêt-jardin présente un taux de stockage de 1,57 T de carbone organique par hectare cultivé et par an, soit une augmentation annuelle moyenne du stock de 2,96%, soit plus de **7 fois l'objectif des « 4 pour mille »**. La parcelle butte présente quant à elle une augmentation du taux de stockage massique de 2,93 T de carbone organique par hectare cultivé et par an, soit une augmentation annuelle moyenne du stock de 5,16%, soit presque de **13 fois l'objectif des « 4 pour mille »**. La parcelle planche présente le taux de stockage le plus important étant donné que le stock de carbone organique y est le plus important, et ce malgré la date de mise en culture plus récente. Le taux de stockage massique annuel est de 5,90 T de carbone organique par hectare cultivé, soit une augmentation annuelle moyenne du stock de 10,41%, soit plus de **26 fois l'objectif des « 4 pour mille »**. Les pratiques de la ferme présentent donc un fort potentiel de stockage de carbone organique dans les sols.

## Formes sous laquelle le carbone organique est stocké

Au-delà de la vérification que ces pratiques augmentent les stocks de carbone organique, il est également important de vérifier sous quelle forme ce carbone est stocké. En effet, si le carbone organique stocké n'est pas, ou peu, protégé chimiquement (par adsorption sur les minéraux) ou physiquement (par occlusion dans les agrégats), il risque de se minéraliser (d'être libéré dans l'atmosphère sous forme de  $CO_2$ ) à la moindre perturbation.

Pour ce faire, les échantillons ont été séparés en plusieurs fractions selon une méthode bien définie. La première étape de cette séparation consiste en un tamisage humide à 250  $\mu m$  puis à 50  $\mu m$ , ce qui signifie qu'on immerge et ressort le tamis 50 fois dans de l'eau déminéralisée afin de briser les particules les moins résistantes. Cela permet de séparer les macroagrégats des microagrégats libres (non-contenus dans les macroagrégats) ainsi que des limons et argiles libres. Cette première étape est représentée par les flèches noires du schéma ci-dessous.

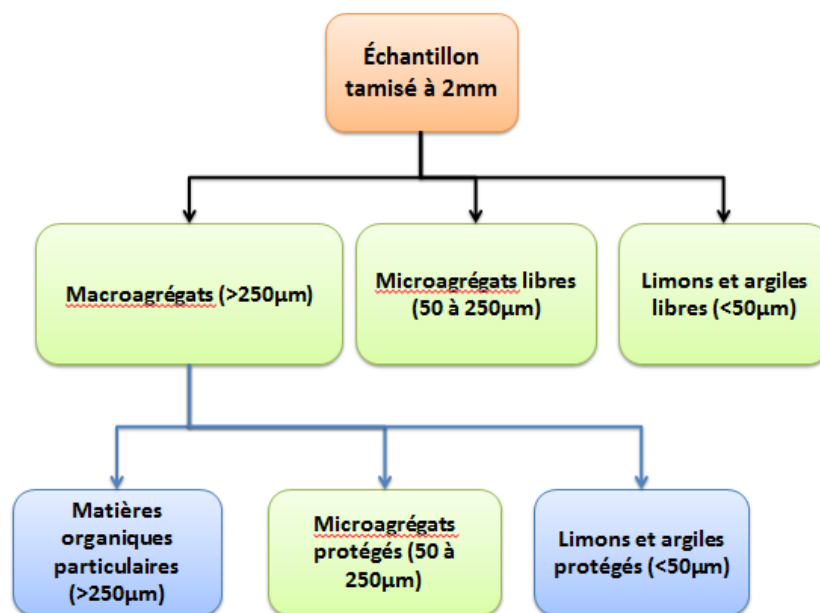


Figure 7 - Etapes et fractions du fractionnement des matières organiques. Les flèches noires représentent la première étape du fractionnement (voir texte), les flèches bleues représentent la seconde étape du fractionnement (voir texte).

La seconde étape consiste à briser les macroagrégats en les percutant avec des petites billes de verre dans de l'eau déminéralisée. Cette destruction des macroagrégats est suivie à nouveau d'un tamisage humide à 250  $\mu m$  puis à 50  $\mu m$ . Cela permet de séparer les matières organiques particulières, c'est-à-dire les grosses particules de matière organique peu dégradées et peu associées à la matrice minérale, des microagrégats protégés (occlus dans les macroagrégats) et des limons et argiles protégés (également occlus dans les macroagrégats). Cette seconde étape est représentée par les flèches bleues du schéma ci-dessus.

Ces 6 différentes fractions ont ensuite été pesées et les concentrations en carbone organique ont été mesurées dans les 3 fractions principales (découlant de la première étape de la séparation), ainsi que dans la fraction des microagrégats protégés. Ce qui a permis de calculer la répartition du stock de carbone organique dans chacune de ces fractions.



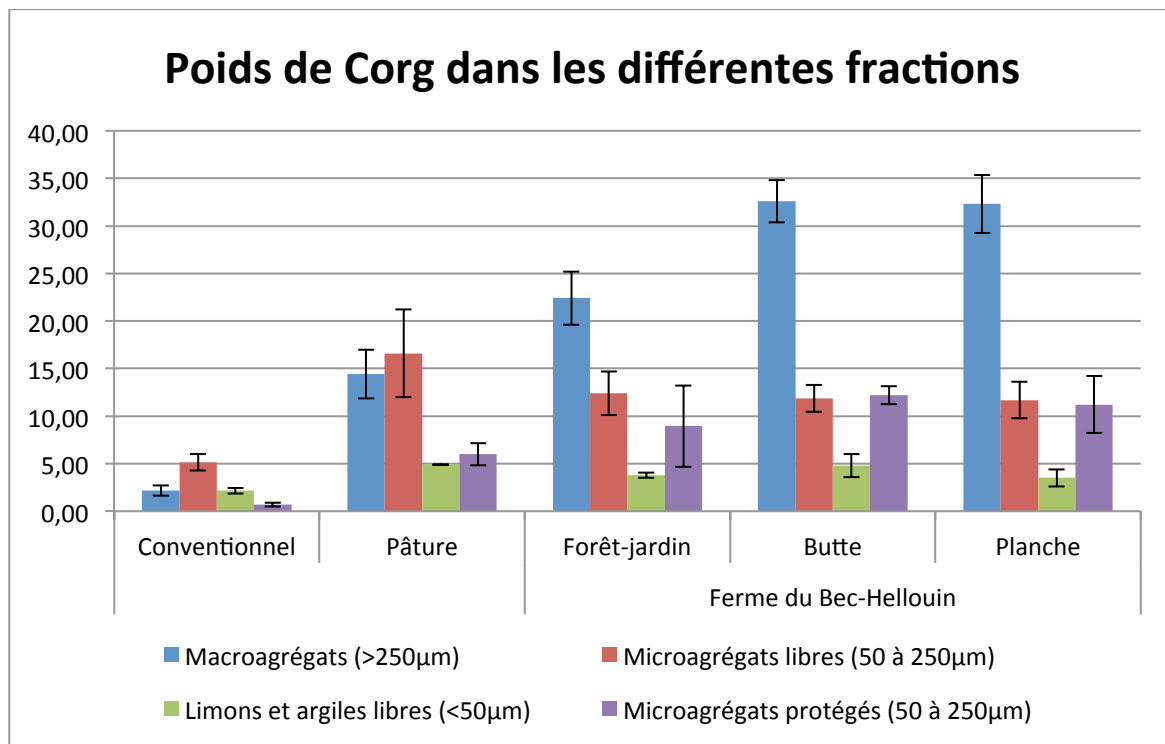


Figure 8 - Moyennes des poids de carbone organique dans les fractions principales ainsi que dans les microagrégats protégés. Les intervalles noirs représentent les intervalles de confiance de ces moyennes.

Le graphe ci-dessus montre les résultats de cette répartition des stocks au sein de chaque parcelle étudiée. On voit tout d'abord que la fraction qui présente les stocks les plus variables est la fraction des macroagrégats (en bleu). Là où la parcelle en agriculture conventionnelle présente une valeur de 2,16 g/kg, les parcelles buttes et planche présentent des valeurs supérieures à 30 g/kg. Cette importante variabilité semble confirmer le fait que la fraction des macroagrégats (= matière organique protégée physiquement) est particulièrement sensible aux perturbations environnementales/pratiques agricoles comme il a été dit plus haut.

*A contrario*, la fraction des limons et argiles libres (vert) présente la variabilité la moins importante (de 2,15 g/kg à 4,91 g/kg). Les matières organiques présentes dans cette fraction sont fortement liées à la matrice minérale par divers processus d'adsorption, elles sont protégées chimiquement. Il a déjà été observé dans plusieurs expériences que cette forme de protection est moins sensible, plus résistante aux perturbations. Dès lors, un sol qui perd de la matière organique verra d'abord celle qui est protégée physiquement (fractions des macroagrégats puis des microagrégats) diminuer avant de voir celle protégée chimiquement (fraction des limons et argiles libres) diminuer. Inversement, un sol qui voit son stock de matière organique augmenter accumulera d'abord dans la fraction des limons et argiles, puis dans la fraction des microagrégats, puis dans les macroagrégats. Si les parcelles de la ferme du Bec Hellouin ainsi que la pâture ne présentent pas des stocks dans la fraction des limons et argiles plus importants que dans la parcelle en agriculture conventionnelle, c'est parce que cette fraction est déjà saturée. On voit donc que si cette fraction à l'avantage de protéger intensément la matière organique, elle montre cependant une capacité de stockage limitée et bien moindre que les fractions de plus grande taille.

Par rapport à la pâture, l'accumulation de carbone organique qui a lieu dans les parcelles de la ferme du Bec Hellouin se fait pour ainsi dire exclusivement dans la fraction des macroagrégats, en grande

partie sous une forme peu associée à la matrice minérale. Cela signifie que cette matière organique accumulée supplémentaire sera assez sensible aux perturbations environnementales, comme le réchauffement des températures par exemple. Il est également important de noter que **plus de 30% de l'accumulation de matière organique dans les macroagrégats se retrouve dans les microagrégats protégés**. Cela signifie que les pratiques de la ferme permettent un turnover suffisamment lent (une durée de vie suffisamment longue) des macroagrégats pour permettre la formation de microagrégats protégés au sein de ceux-ci. Ces pratiques ont donc un **effet positif sur la protection physique des matières organiques**. *A contrario*, la quasi inexistence de stock au sein des microagrégats protégés dans la parcelle en agriculture conventionnelle montre que les pratiques qui y sont implémentées ne permettent pas la formation de microagrégats protégés.

Un autre point à mettre en évidence est le stock moins important dans la fraction des microagrégats libres dans les parcelles en permaculture que dans la pâture. Cela peut sembler contre-intuitif étant donné que les parcelles de la ferme reçoivent des quantités de matière organique plus importantes que la pâture. Cela peut peut-être s'expliquer par le fait que les apports de matière organique sont tellement importants sur les parcelles de la ferme que l'activité biologique y est excessivement boostée, d'un point de vue du stockage de la matière organique dans les sols du moins. Dès qu'une situation de carence en matière organique fraîche apparaît, même de manière locale, il est possible que les micro-organismes se mettent alors à consommer les liens qui stabilisent les microagrégats libres (polysaccharides), comme source d'énergie. Leur stabilité diminue alors et entraîne à long terme une diminution des stocks dans cette fraction. Si cette hypothèse se révélait véridique, cela signifierait qu'une diminution des apports de matière organique pourrait peut-être entraîner une augmentation des stocks protégés physiquement.

## V. Conclusion

L'étude des sols de la ferme du Bec Hellouin et la comparaison avec une pâture et une parcelle en agriculture conventionnelle ont donné des résultats clairs et marqués. Tout d'abord, les pratiques de la ferme du Bec Hellouin ont un effet positif sur la fertilité du sol. Les quantités d'éléments biodisponibles y sont beaucoup plus importantes que dans la parcelle en agriculture conventionnelle et la parcelle pâture. De plus, la CEC (capacité d'échange cationique) y est également beaucoup plus importante que dans la parcelle en agriculture conventionnelle. Elle n'est toutefois pas différente que dans la pâture. Par contre, le taux de saturation en bases est plus important dans les parcelles de la ferme du Bec Hellouin que dans la parcelle pâture. Dans tous les cas, cela semble permis par la gestion des résidus de culture et les apports de matière organique fraîche sur les sols de la ferme. **Ces pratiques proposent donc un moyen d'amener les sols à un excellent état de fertilité tout en prônant l'utilisation exclusive de fertilisants organiques.**

D'autre part, **les pratiques de la ferme montrent un fort potentiel d'augmentation des stocks de carbone organique dans les sols avec des taux de stockage allant de 7 à 26 fois l'objectif des « 4 pour mille » dans les 10 premiers centimètres de sol** et ce malgré des concentrations en carbone organique dans les sols déjà importantes avant la mise en place des cultures. *A contrario*, le sol de la parcelle en agriculture conventionnelle présente des concentrations en carbone organique

particulièrement basses, ce qui est en accord avec la tendance générale observée dans les sols gérés suivant ces pratiques.

Les quantités de carbone organique accumulées dans les parcelles de la ferme du Bec Hellouin se retrouvent en majorité sous forme de matière organique particulaire, ce qui signifie que ces stocks seront sensibles aux perturbations environnementales éventuelles. Toutefois, une partie de ces stocks accumulés se retrouvent au sein des microagrégats protégés. Ce qui signifie que, d'une part, les pratiques entraînent une durée de vie des macroagrégats suffisamment longue pour permettre la formation de microagrégats protégés. Et que, d'autre part, ces pratiques favorisent la stabilisation physique des matières organiques.

**Loin d'avoir la prétention d'évaluer la pertinence de l'entièreté du système proposé par la ferme du Bec Hellouin, cette étude montre toutefois que les pratiques qui y sont implémentées ont un fort potentiel bénéfique sur l'état des sols et sur l'augmentation des services écosystémiques rendus par ceux-ci.**

Afin de pouvoir évaluer le système selon une grille de lecture plus complète, il serait intéressant :

- D'analyser le cycle de vie des matières organiques externes apportées aux sols de la ferme. En effet, il faudrait estimer si les quantités apportées seraient soutenables dans le cas où le modèle proposé par la ferme du Bec Hellouin se généralisait.
- D'analyser les lixiviats sous les parcelles cultivées afin de s'assurer que les niveaux de fertilité et les apports importants n'entraînent pas une pollution des nappes phréatiques.
- D'étudier les effets d'une diminution des apports de matière organique dans les parcelles planche et butte afin de vérifier si les quantités de matière organique protégées physiquement augmenteraient bel et bien comme cela a été suggéré plus haut.
- De manière plus générale, il serait intéressant de vérifier que la diminution des apports de matière organique, en particulier sur les parcelles planche et butte, entraînerait une réduction des bénéfices engendrés par ces apports. En effet, il est possible que même avec une réduction des apports, le sol de ces parcelles présente des qualités agronomiques et des stocks de carbone organique aussi importants.

Ainsi seulement, et en associant les résultats de cette étude aux résultats des autres études qui ont déjà été réalisées et seront réalisées sur la ferme du Bec Hellouin, nous pourrions évaluer avec justesse la pertinence de ce système et son potentiel à apporter des solutions aux problématiques que nous traversons et traverserons.