

Nom du candidat : TOURREL  
Prénoms : Mathilde Emilie Cécile  
**N° Candidat** : A BCPST-2264  
Noms des auteurs  
en cas de travail commun :  
BOUVARD Anouk  
FARRE Arnaud  
ZACHARIE Audrey

**BANQUE AGRO-VETO – Session 2013**

**T.I.P.E.**

**TITRE : Les transferts de matière au sein d'un écosystème : le sol**

**RÉSUMÉ** (en six lignes) :

Le sol, qui correspond à la couche superficielle de la croûte terrestre, c'est-à-dire à l'interface entre l'atmosphère, la lithosphère et la biosphère, est un écosystème. Nous nous sommes intéressés à une partie des organismes de cet écosystème, la pédofaune et les Champignons car ils sont en grande partie responsables des transferts de matière. Nous avons donc tenté de quantifier les transferts de carbone et de certains ions à l'intérieur de l'écosystème sol ainsi que ceux de carbone du sol vers l'atmosphère. Afin de comprendre l'influence de la composition du sol sur l'activité biologique de cet écosystème, nous avons choisi d'étudier trois types de sols : un sol de chênaie, un de hêtraie-sapinière et un de pessière.

**Nombre de caractères** (espaces compris) : 20279

## Sommaire

Introduction	1
I/ Etude des organismes participant aux transferts au sein de l'écosystème sol	2
A. Prélèvement de sols forestiers	2
B. Caractérisation des Champignons des trois sols	2
C. Caractérisation de la pédofaune des trois sols	2
II/ Etude des transferts de carbone dans les sols	4
A. Dégradation de la matière organique carbonée	4
B. Evolution de la teneur en carbone organique du sol	5
C. Etude du transfert de CO <sub>2</sub> du sol à l'atmosphère	5
III/ Etude des transferts d'ions dans les sols	6
A. Evolution du pH	6
B. Evolution de la teneur en nitrates	8
Conclusion	9
Bibliographie	10
Contacts	10

## Introduction

En France métropolitaine, la forêt représente environ 30% du territoire. Elle renferme une grande diversité d'êtres vivants, souvent peu connus de ses utilisateurs. Ces êtres vivants, pour la plupart de petite taille, jouent de nombreux rôles dans l'écosystème que constitue le sol de la forêt. Le sol correspond à la couche superficielle de la croûte terrestre, il comprend un biotope, c'est-à-dire un milieu physico-chimique qui entoure des êtres vivants. Ce biotope est formé des éléments minéraux issus de l'altération d'une roche mère et de la matière organique en décomposition issue de la biosphère. L'ensemble des êtres vivants qu'il entoure constitue la biocénose. Le biotope et la biocénose forment un écosystème. Avec le thème "Transfert, échange", nous avons pensé aux écosystèmes, qui sont le siège de transferts d'énergie et de matière. Un transfert correspond au transport de matière d'un lieu à un autre alors qu'un échange est le transfert réciproque entre deux acteurs. Nous nous sommes donc intéressés à l'écosystème correspondant à la partie supérieure du sol, à savoir jusqu'à trente centimètres de profondeur, et aux transferts qui s'y produisent. Quels sont les transferts qui s'effectuent dans le sol ? Comment les caractériser et quels sont les paramètres qui les influencent ?

Nous avons effectué nos expériences sur trois sols provenant de trois différents types de forêts, afin de déterminer l'influence de la composition du sol sur l'activité biologique de l'écosystème. Après avoir étudié les organismes qui participent aux transferts dans le sol, nous nous sommes intéressés à ces transferts, en particulier ceux de carbone et d'ions H<sup>+</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

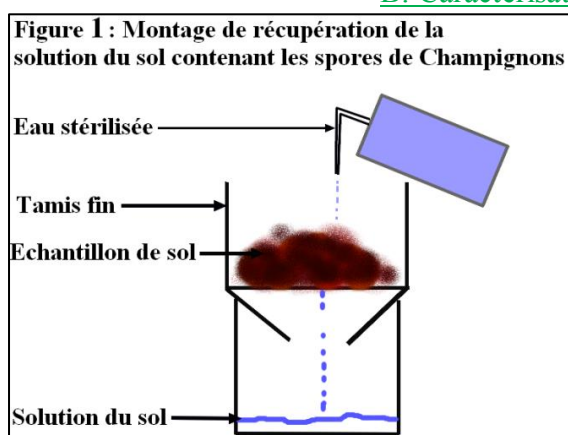
## I/ Etude des organismes participant aux transferts au sein de l'écosystème sol

### A. Prélèvement de sols forestiers

Nous avons prélevé environ quinze kilogrammes de sol dans trois forêts différentes : une chênaie, une hêtraie-sapinière et une pessière (forêt d'Épicéas). La chênaie dans laquelle nous avons effectué les prélèvements se situe à 400 mètres d'altitude, en milieu plutôt sec et urbain. La hêtraie sapinière et la pessière se situent à 1100 mètres d'altitude, en milieu humide et montagneux. Ces forêts ont des caractéristiques différentes, puisque l'une est une forêt de feuillus, l'autre une forêt mixte et la dernière, une forêt de conifères. Pour ces deux dernières, nous nous attendons à avoir des sols plus acides<sup>(1)</sup>. Ceci nous permet de comparer l'évolution des caractéristiques de chaque sol au cours du temps pour des mêmes conditions physico-chimiques, que nous avons fixées.

Nous allons par la suite nous intéresser aux organismes du sol, en particulier à la pédofaune, c'est-à-dire aux animaux qui y vivent de façon temporaire ou permanente<sup>(1)</sup> et aux Champignons, car ils participent activement aux transferts s'effectuant dans le sol.

### B. Caractérisation des Champignons des trois sols



Afin de comprendre le rôle des Champignons dans le sol, nous les avons dans un premier temps extraits. Pour cela, nous avons récupéré leurs spores dans la solution du sol (Figure 1), puis à l'aide d'une oese, nous les avons déposées sur un milieu complet en conditions stériles.

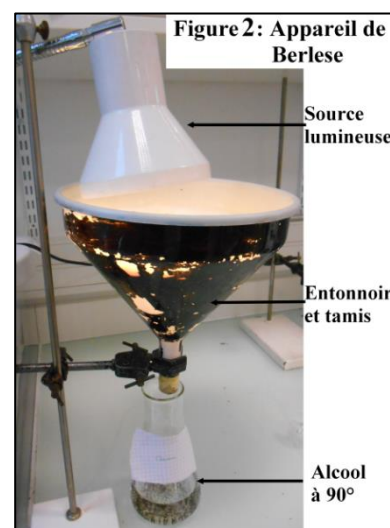
Nous avons tenté de les identifier. Le travail d'identification n'a pas abouti, celui-ci étant très difficile. Nous savons seulement que les Champignons qui se sont développés sont des Septomycètes<sup>(a)</sup>.

### C. Caractérisation de la pédofaune des trois sols

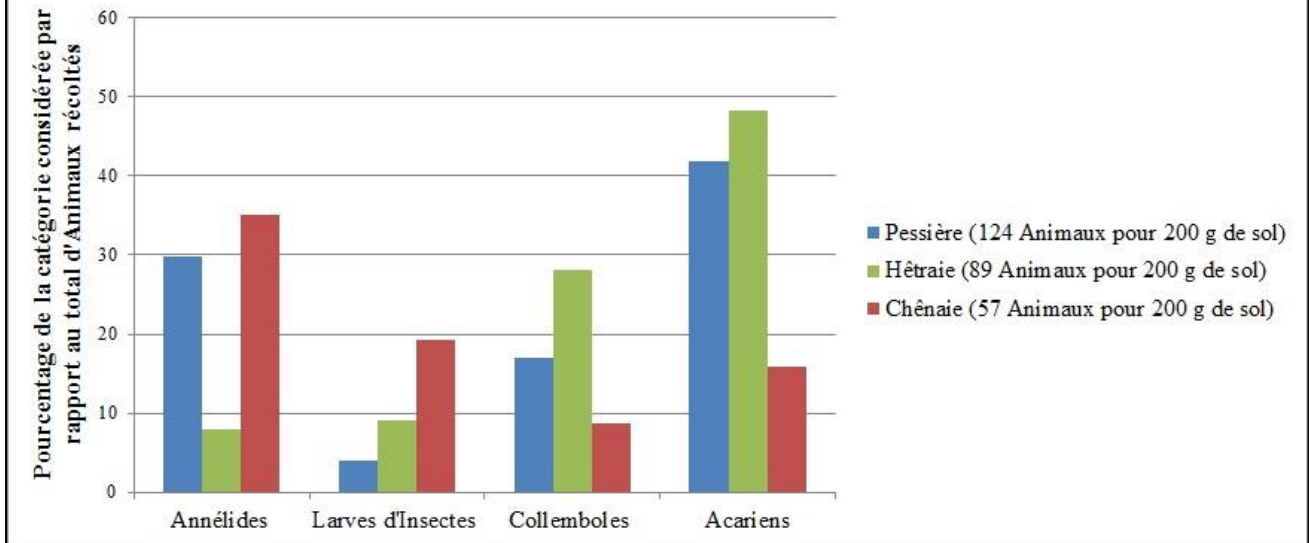
Pour étudier la pédofaune, nous avons placé 100,0 g de terre dans des appareils de Berlese (Figure 2). Il s'agit d'un extracteur à sec, qui chasse la faune en desséchant lentement le sol du haut vers le bas. Les organismes extraits sont conservés dans de l'alcool à 90°. Comme la taille du tamis est de 4 mm, ceux-ci font partie de la mésofaune (caractérisée par une longueur de 0,2 à 4 mm)<sup>(1)</sup>. Nous avons réalisé deux fois les extractions au cours de l'année. Grâce à une clé de détermination<sup>(b)</sup> de la mésofaune, nous avons ensuite identifié ces différents organismes.

Les résultats montrent que chaque sol contient des organismes qui lui sont propres (Figure 3).

Nous remarquons que le nombre total d'organismes du sol de pessière est 1,5 fois supérieur à celui de la hêtraie. De même, le sol de hêtraie possède 1,5 fois plus d'organismes que le sol de chênaie. Par conséquent, le sol de chênaie aurait l'activité biologique la plus faible et celui de pessière la plus élevée à condition que le nombre d'organismes de la mésofaune représente l'activité biologique totale du sol.

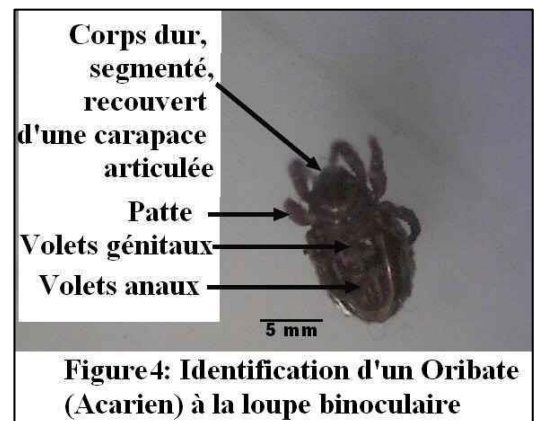


**Figure 3 : Proportions relatives des catégories principales de mésofaune dans les trois sols**



Nous pouvons regrouper ces organismes en 4 catégories principales qui sont représentées dans des proportions différentes pour chaque sol :

- les larves d'Insectes (Arthropodes Mandibulates) sont présentes en quantité deux fois plus grande dans le sol de chênaie que dans le sol de hêtraie et quatre fois plus grande que dans le sol de pessière.
- les Collembolles (Arthropodes Pancrustacés) sont présents en quantité trois fois plus grande dans le sol de hêtraie que dans le sol de chênaie et en quantité 1,5 fois plus grande que dans le sol de pessière. Ils sont principalement fongivores. Ils stimulent le développement des Champignons<sup>(2)(3)</sup> par le transport de spores dans leur tube digestif ce qui permet la propagation des espèces. Par conséquent, nous pouvons supposer que les Champignons du sol de hêtraie, plus nombreux, dégradent plus rapidement la cellulose que ceux des autres sols. Ainsi, dans ce sol, les transferts de carbone des producteurs aux consommateurs sont favorisés. Par ailleurs, les Collembolles permettent la fragmentation du sol et le brassage de la matière organique, ce qui favorise ces transferts.
- les Acariens (Arthropodes Arachnides) (*Figure 4*) sont en quantité trois fois plus importante dans les sols de hêtraie et de pessière que dans le sol de chênaie. Les régimes alimentaires sont très variés au sein de ce taxon. Ils régulent entre autres les populations de micro et mésofaune et fragmentent le sol.
- les Annélides sont en quantité quatre fois plus importante dans le sol de chênaie et de pessière que dans le sol de hêtraie. Ce sont des animaux phytosaprophages : ils consomment la matière organique morte d'origine végétale. De plus, ils stimulent l'activité des micro-organismes. Ils permettent la formation de complexes argilo-humiques.



Globalement, ces organismes favorisent l'activité biologique totale du sol.

## II/ Etude des transferts de carbone dans les sols

Pour récupérer de l'énergie et des nutriments, les organismes du sol échangent de la matière organique. En particulier, le carbone organique est extrait des feuilles mortes tombées au sol par les consommateurs primaires. Puis il est transféré aux consommateurs secondaires. Nous nous sommes demandés comment évolue la teneur en carbone organique dans un sol au cours du temps.

### A. Dégradation de la matière organique carbonée

La cellulose est un polymère de  $\beta$ -glucose, elle constitue donc une forme de carbone organique pouvant être utilisée par les animaux du sol. Elle se situe dans les parois des cellules végétales. A l'automne, lorsque les feuilles tombent, elles sont dégradées par les organismes du sol. Ceci peut se remarquer par l'observation de feuilles squelettisées (Figure 5). Afin de quantifier la décomposition de la cellulose au cours du temps, nous avons placé des échantillons des 3 sols sur des feuilles

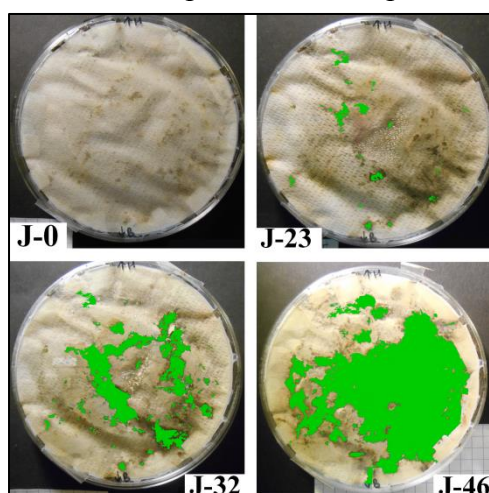


Figure 6 : Dégradation de la cellulose par les organismes du sol de pessière, après coloration des zones consommées

de papier filtre, dans des boîtes de Petri. Les échantillons sont humidifiés régulièrement. Nous avons photographié les boîtes chaque semaine. En parallèle, les mêmes expériences ont été menées avec des échantillons de sol stérile, obtenus après chauffage et stérilisation à l'eau de Javel. Après coloration des zones dégradées (Figure 6), nous déterminons à l'aide du logiciel Mesurim le pourcentage de cellulose consommée pour chaque échantillon au cours du temps (Figure 7).

Nous remarquons que pour les échantillons stérilisés, la cellulose n'est pas dégradée. Par conséquent, ce sont bien les organismes qui sont responsables de la dégradation de cette forme de carbone organique.

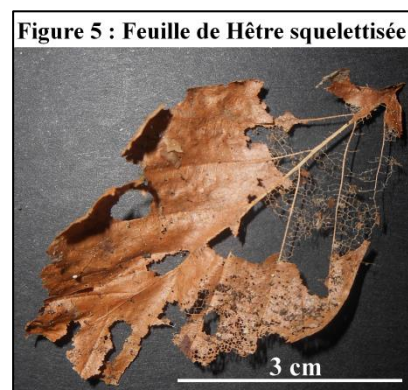
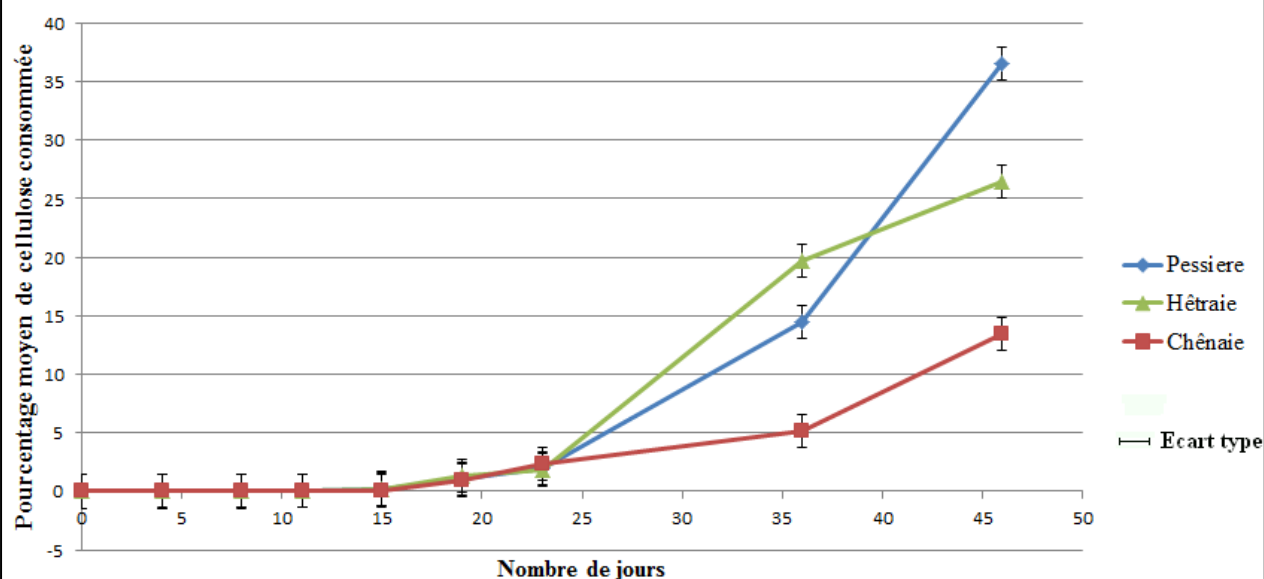


Figure 5 : Feuille de Hêtre squelettisée

Figure 7 : Pourcentage moyen de cellulose dégradée au cours du temps





Les 23 premiers jours, les valeurs sont significativement identiques, puis le pourcentage moyen de cellulose dégradée est multiplié de 2 à 10 en 13 jours. Cette lente dégradation initiale peut s'expliquer par le développement préalable de Champignons.

Au bout de 46 jours, les feuilles de cellulose placées sous le sol de pessière et de hêtraie sont deux fois plus dégradées que celles placées sous le sol de chênaie. Ceci vérifie l'hypothèse d'une activité biologique plus importante dans ces deux premiers sols. Le transfert de carbone organique des producteurs aux consommateurs est donc plus rapide dans ces deux derniers que dans le sol de chênaie.

### B. Evolution de la teneur en carbone organique du sol

Puisque nous n'avons pas rajouté de matière organique à la surface des sols, la quantité de carbone organique devrait diminuer, les êtres vivants hétérotrophes consommant ce dernier et le rejetant sous forme de carbone minéral.

Afin de déterminer la teneur en carbone organique d'un échantillon du sol, nous avons adopté la méthode de dosage de Walkley et Black<sup>(3)</sup>. Le carbone de la matière organique est oxydé par un mélange de bichromate de potassium et d'acide sulfurique. Puis l'excès de bichromate est dosé par le sel de Mohr, par potentiométrie. Nous avons réalisé plusieurs fois ce dosage à partir d'échantillons de moins de 3 g de sol, mais les résultats n'étaient pas exploitables car il n'y avait pas de saut de potentiel nous permettant de trouver la concentration initiale en bichromate, donc la concentration en carbone organique. Etant donné que ce dosage est long à mettre en place, nous avons cherché une autre méthode pour quantifier la teneur en carbone.

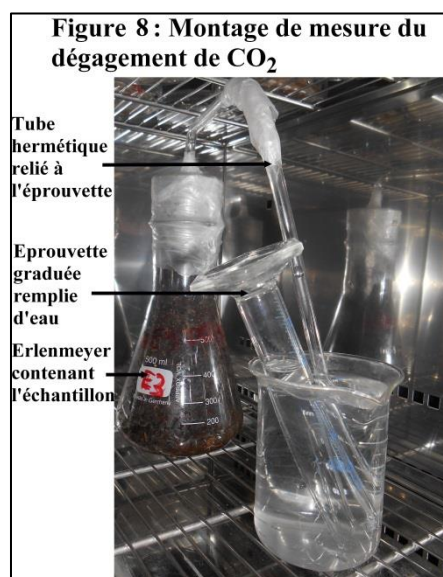
### C. Etude du transfert de CO<sub>2</sub> du sol à l'atmosphère

Les êtres vivants hétérotrophes au carbone dégradent le carbone organique par respiration ou fermentation alcoolique, ce qui libère du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Par conséquent, au lieu de mesurer la teneur en carbone organique, nous pouvons nous intéresser à la quantité de CO<sub>2</sub> rejetée au cours du temps.

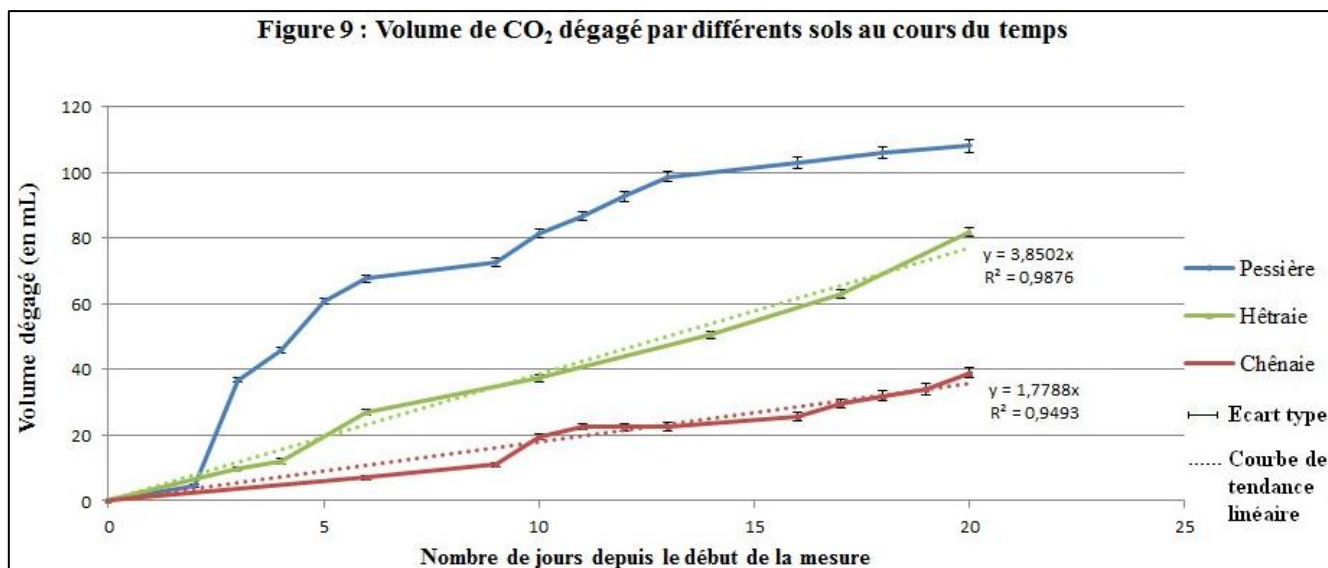
Pour mesurer celle-ci, nous avons rempli des erlenmeyers avec 300 g de terre en laissant très peu d'air, de façon à avoir un milieu anaérobie, afin d'étudier le dégagement de CO<sub>2</sub> dû à la fermentation alcoolique. Nous mesurons ce dégagement en relevant le volume de gaz libéré dans une éprouvette graduée retournée remplie d'eau (*Figure 8*). Nous effectuons les mesures sur 20 jours pour chaque sol.

Afin d'identifier le gaz rejeté, nous remplaçons l'eau par de l'eau de chaux lors d'une mesure : celle-ci se trouble, donc au moins une partie du gaz qui est dégagé est du CO<sub>2</sub>.

D'après la *figure 9*, le sol de pessière dégage deux fois plus de CO<sub>2</sub> que celui de hêtraie et cinq fois plus que celui de chênaie. Nous retrouvons l'ordre établi précédemment dans lequel la pessière est le sol qui présente l'activité biologique la plus grande. En effet, ce sol est le plus riche en animaux, le plus efficace lors de la dégradation de cellulose et il rejette le plus de CO<sub>2</sub>. Le sol de chênaie est celui qui dégage le moins de CO<sub>2</sub> (environ 2 mL par jour). Ce sol présente bien l'activité biologique la plus faible.



Par ailleurs, le dégagement est à peu près constant au cours du temps pour ces deux sols. Pour le sol de pessière, le volume dégagé est important au début puis devient de plus en plus faible : ceci peut être dû à une diminution de la quantité de matière organique disponible dans le milieu.



Les êtres vivants sont impliqués dans le cycle du carbone puisqu'ils utilisent de la matière organique carbonée et qu'ils rejettent du carbone minéral. De cette manière, ils modifient leur environnement en réalisant des transferts de molécules carbonées.

### III/ Etude des transferts d'ions dans les sols

D'autres éléments du sol, comme les protons ou les nitrates, peuvent être impliqués dans ces transferts.

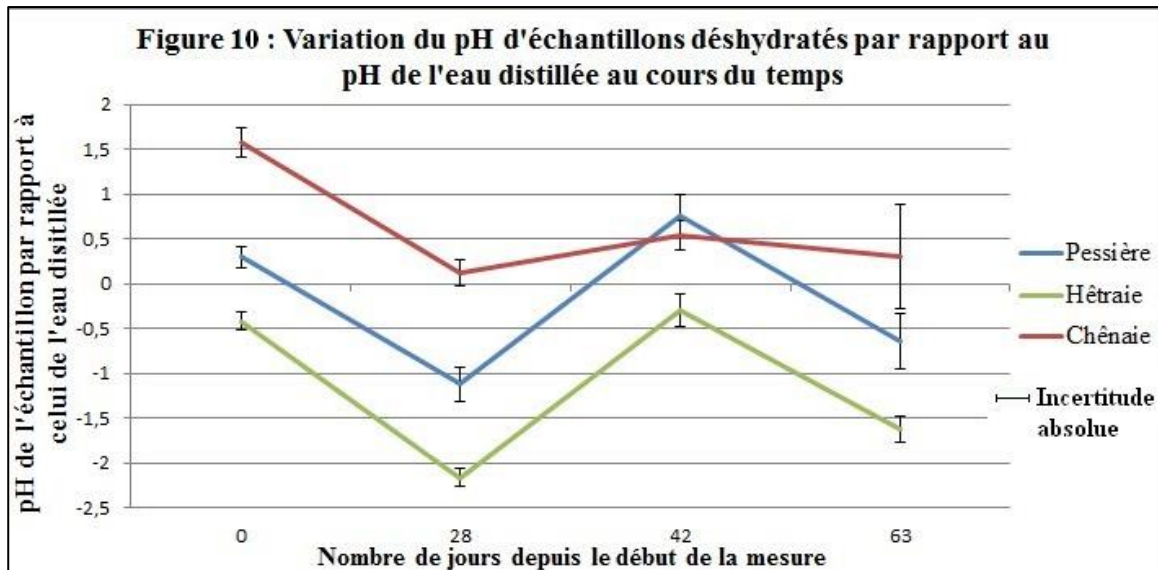
#### A. Evolution du pH

Dans le sol, la variation du pH est sous double influence : celle de la biocénose et celle du biotope. En effet, les organismes acidifient le sol notamment par leur respiration. Par ailleurs, il faut considérer l'aspect physique du sol. Les argiles s'associent à la matière organique du sol (l'humus) pour former, sous l'action stabilisatrice du calcium, un complexe argilo-humique. Par sa forte charge négative, ce complexe est très adsorbant : il fixe facilement des cations du sol et échange en permanence des ions avec la solution du sol environnante. Ainsi, le pH dépend à la fois de la quantité de protons associés aux complexes et de la quantité de protons produits par les êtres vivants.

Tout d'abord, nous testons l'effet du biotope sur le pH. Pour cela, nous mesurons le pH au cours du temps pour des échantillons prélevés dans des sols stérilisés et déshydratés : le métabolisme y est supposé nul. Nous effectuons un prélèvement de 10,0 g dans chaque sol. Cet échantillon est passé au tamis de 2 mm puis mis en solution avec de l'eau distillée. Après agitation, la solution est filtrée sur un entonnoir de Buchner puis décantée. Nous mesurons la teneur en protons de l'eau distillée, puis celle de la solution du sol grâce à un pH-mètre.

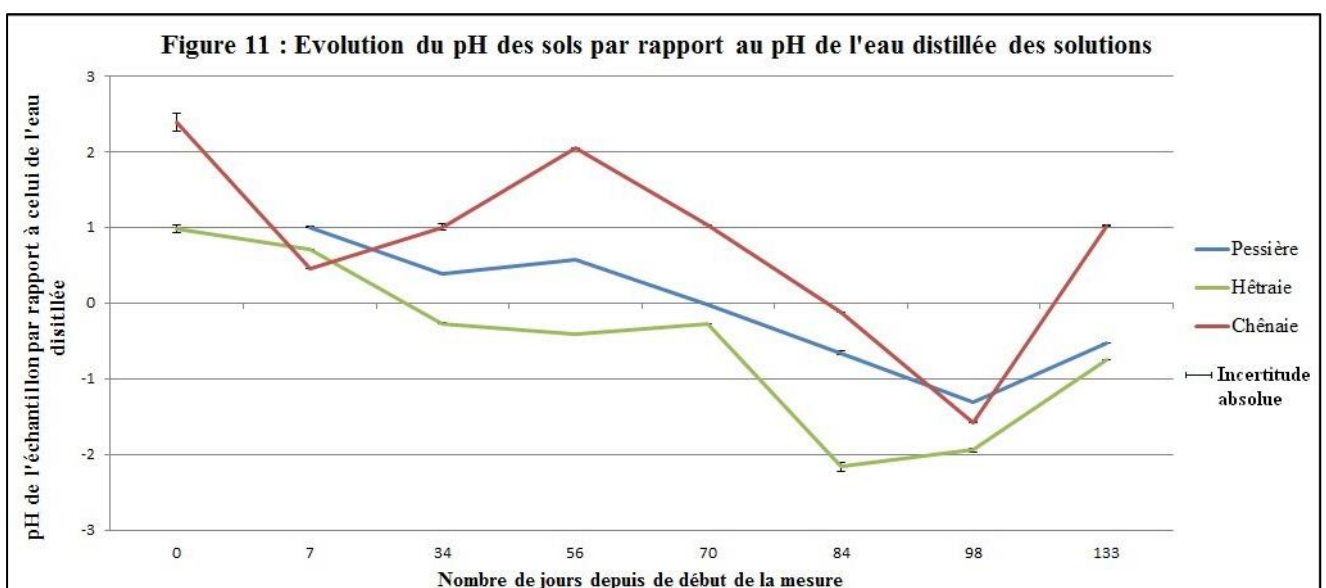
Pour les trois sols, nous observons une acidification significative d'environ 1,2 unité pH sur les 28 premiers jours (*Figure 10*). Le biotope a donc une influence sur le pH puisque celui-ci varie de manière significative. Pour la chênaie, les barres d'erreurs se recoupent donc nous pouvons

considérer que le pH est constant. Pour les deux autres sols, le pH augmente d'environ 2,0 unités puis il diminue à nouveau d'environ 1,0 unité. Il semble qu'il y ait un effet tampon, probablement dû aux complexes argilo-humiques. En outre, le sol de chênaie est initialement plus basique que les sols de hêtraie et de pessière, ce qui est cohérent avec les caractéristiques de ces sols<sup>(1)</sup>.



Puis, nous mesurons le pH de solutions d'échantillons directement prélevés dans les bacs ce qui nous permet de tester l'effet de la biocénose (*Figure 11*). Nous observons que les sols de hêtraie et de pessière s'acidifient de 1 à 1,5 unité pH sur 133 jours ce qui est lié à l'activité des organismes. En effet, la présence d'organismes actifs est le seul paramètre qui diffère de l'expérience précédente. Ainsi, l'activité des organismes semble masquer l'effet tampon dû aux complexes argilo-humiques. Cependant, la dernière mesure montre que le pH augmente d'environ 1 unité. Ceci peut être la réponse des complexes argilo-humiques à une acidification trop intense.

Pour le sol de chênaie, le pH fluctue plus que pour les autres sols même si nous constatons une acidification globale de 1,4 unité pH. Nous pouvons supposer que ce sol est plus riche en complexes argilo-humiques ou qu'il présente moins d'organismes, ce qui est cohérent avec les résultats d'identification de la mésofaune et le faible dégagement de CO<sub>2</sub>.



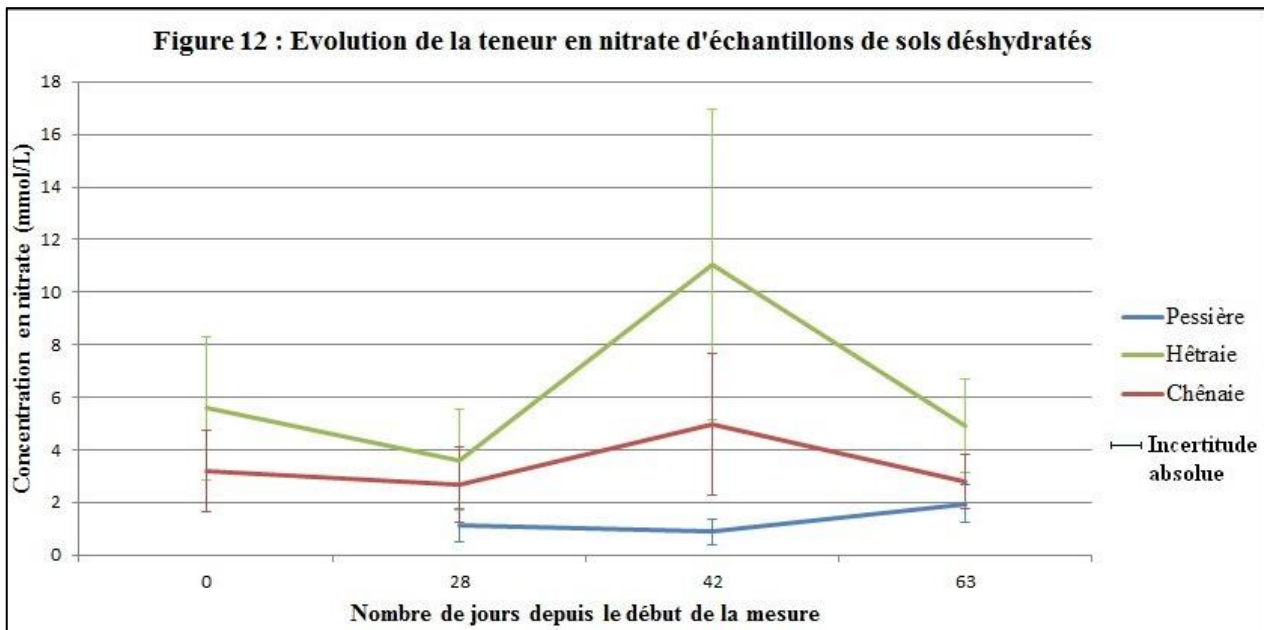


## B. Evolution de la teneur en nitrates

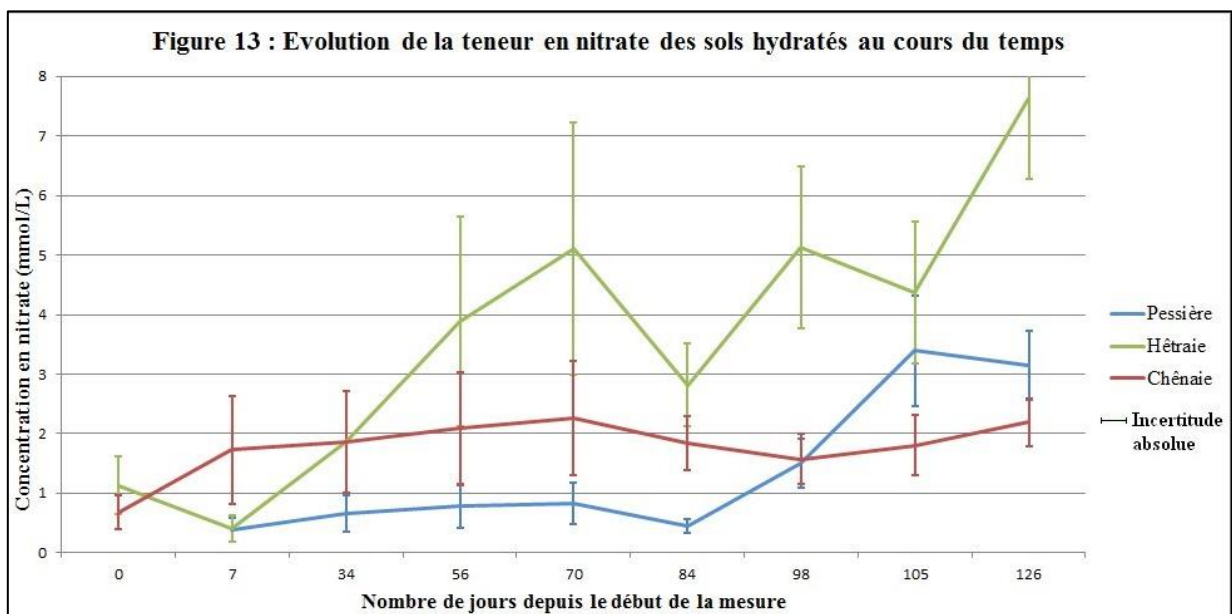
Comme pour les protons, nous testons l'effet de la biocénose et du biotope dans les transferts d'ions nitrate. En effet, ces derniers sont impliqués dans le métabolisme de certaines bactéries et dans celui des végétaux.

Pour mesurer la teneur en nitrate d'un échantillon du sol, nous utilisons les solutions précédentes et une électrode à nitrate préalablement étalonnée.

Nous suivons l'évolution de la teneur en nitrate d'échantillons prélevés dans des sols déshydratés afin de tester l'effet du biotope (*Figure 12*). Les barres d'erreurs se recoupent pour les trois sols sur toute la période de mesure. Par conséquent, la teneur en nitrate reste constante. Nous en déduisons que le biotope n'a pas une influence significative sur les transferts de nitrate.



Nous testons ensuite l'effet de la biocénose (*Figure 13*). Nous observons une augmentation significative de la teneur en nitrate de 0,68 mmol/L à 2,2 mmol/L pour le sol de chênaie et une augmentation de 0,38 mmol/L à 3,1 mmol/L pour le sol de pessière. La formation de nitrate par les bactéries de ces sols a lieu : en effet, des nitrobactéries réalisent la chimiosynthèse en oxydant des ions ammonium en ions nitrates, ce qui permet la formation d'ATP et de  $\text{NADPH}, \text{H}^+$ . Ces



molécules sont ensuite utilisées dans le cycle de Calvin et permettent aux nitrobactéries d'être autotrophes au carbone. Or nous avons constaté le développement de Végétaux dans les bacs. Ces derniers utilisent du nitrate comme source d'azote minéral ce qui entraînerait un appauvrissement du milieu. La nitrification semble donc compenser l'absorption de nitrate par les végétaux pour ces deux sols.

Pour la hêtraie nous remarquons une augmentation significative de la teneur en nitrates, qui passe de 1,1 mmol/L à 7,6 mmol/L, soit deux à trois fois plus que pour les sols précédents : la nitrification y semble donc plus intense, sans doute grâce à l'activité des nitrobactéries.

## Conclusion

D'après nos résultats et les recherches bibliographiques, nous avons établi un organigramme récapitulant les différents transferts au sein de l'écosystème du sol (*Figure 14*). Nous nous intéressons au devenir d'une feuille. Ses composants sont digérés par différents acteurs de l'écosystème du sol :

- les Mycètes transforment la lignine en humus par dégradation enzymatique
- de même, les Mycètes et les bactéries transforment la cellulose en humus
- la mésofaune se nourrit des protéines, de lipides et de glucides (cellulose) partiellement digérés par les Champignons.

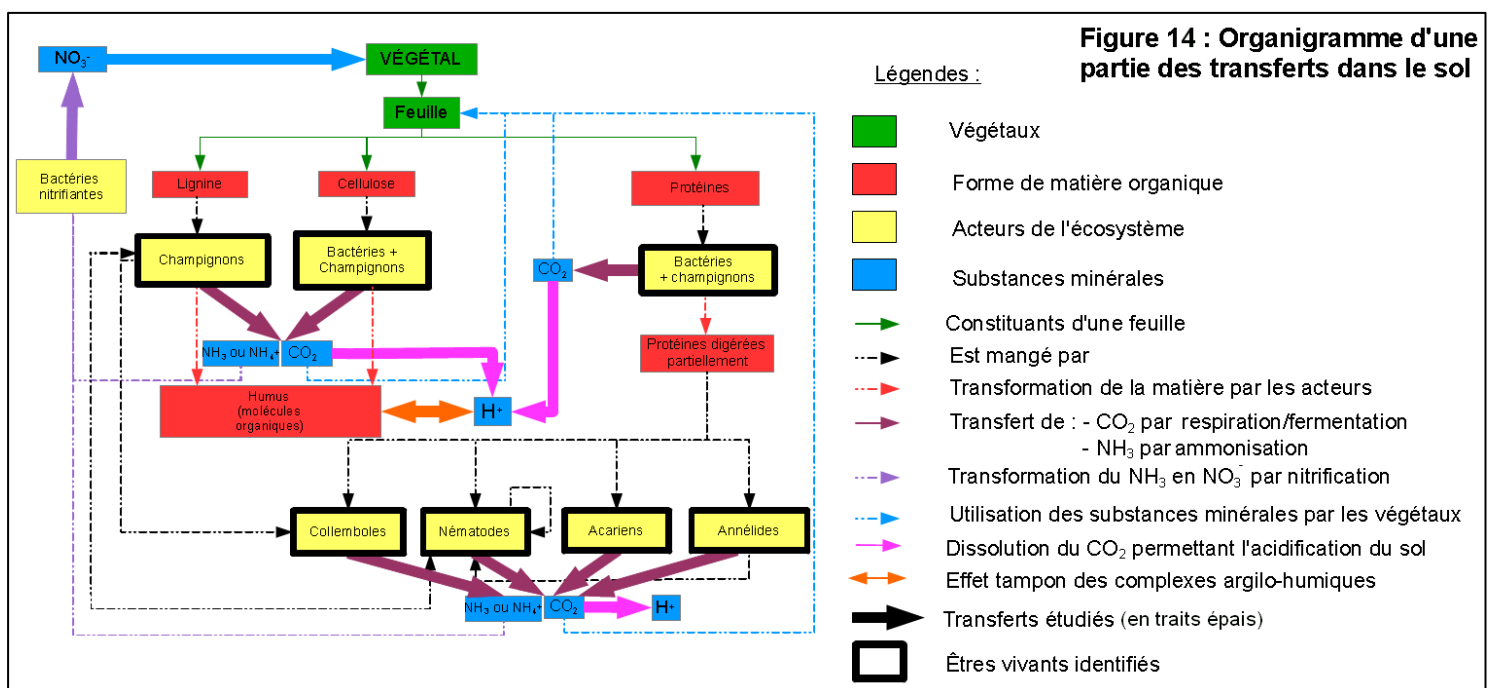
Par ailleurs, il existe d'autres interactions trophiques entre les acteurs de l'écosystème :

- certains Champignons mangent les Nématodes
- certains Collemboles mangent des Champignons
- certains Nématodes sont carnivores

Tous ces acteurs minéralisent la matière organique par différentes réactions :

- minéralisation du carbone organique par respiration et fermentation alcoolique
- minéralisation de l'azote organique par ammonisation, puis certaines bactéries nitrifiantes forment du nitrate à partir de  $\text{NH}_3$  ou  $\text{NH}_4^+$ .

Finalement, les Végétaux utilisent les substances minérales ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) pour leur métabolisme. Nous avons ainsi abordé certaines parties du cycle de la matière, indiquées par des traits épais.



Durant cette année, nous avons eu un aperçu de la diversité des organismes du sol et de leur implication dans le fonctionnement de l'écosystème grâce aux transferts de matière qu'ils réalisent. Nous avons montré que le biotope, notamment le type de sol, modifie l'activité biologique, donc les transferts dans l'écosystème. Les expériences menées nous ont permis de constater que l'étude des écosystèmes dont les sols est complexe. Néanmoins, elle est enrichissante et pourrait avoir des applications pratiques puisque de récentes recherches en bio raffinerie (transformation de la biomasse en biocarburant) montrent que l'étude des sols, particulièrement celle des enzymes de Champignons décomposeurs, pourrait aider à la substitution d'énergies fossiles. En effet, la décomposition du bois par ces enzymes permet de former des molécules qui peuvent être réutilisées par la suite pour produire du carburant.

## Bibliographie

- <sup>(1)</sup> Gobat, Aragno, Matthey, Le sol vivant, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2010
- <sup>(2)</sup> [www.agroforesterie.fr/CASDAR/20062008/rapports0608/R63.pdf](http://www.agroforesterie.fr/CASDAR/20062008/rapports0608/R63.pdf) , Raphaël Métral : responsable du groupe d'études. Ce document est une synthèse sur la diversité de la pédofaune. Il résume entre autres les différents régimes alimentaires de la pédofaune. Dernière consultation le 17/05/2014.
- <sup>(3)</sup> [http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/71/05/PDF/Ponge\\_Charpentia\\_1981.pdf](http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/50/71/05/PDF/Ponge_Charpentia_1981.pdf), J.-F. Ponge et M.-J. Charpentie : auteurs de l'étude sur les relations entre la microflore-microfaune. Il nous a permis de comprendre l'origine de la stimulation du développement des Champignons par les Collemboles. Dernière consultation le 22/05/2014.
- <sup>(3)</sup> Pansu, Gautheyrou, L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale, Springer, 2003
- Leroy, La forêt redécouverte, Belin, 2009
- Frontier, Pichod-Viale, Ecosystèmes : Structure. Fonctionnement. Evolution, Dunod, 1998
- Davet, Vie microbienne du sol et production végétale, INRA éditions, 1996

## Contacts

Un grand merci aux personnes suivantes qui ont répondu à nos questions et nous ont beaucoup aidé dans nos démarches :

- <sup>(a)</sup> M. Marcel Lecomte, mycologue et consultant en techniques de microscopie optique,
- <sup>(b)</sup> M. Stéphane Bec, professeur de biologie des organismes et d'écologie,
- M. Gilles Domenech, pédologue.