



**HAL**  
open science

# Histoire et dynamique des forêts anciennes du nord de la France par l'étude des archives du sol. Approche méthodologique et statistique de la pédoanthracologie.

Thomas Feiss

## ► To cite this version:

Thomas Feiss. Histoire et dynamique des forêts anciennes du nord de la France par l'étude des archives du sol. Approche méthodologique et statistique de la pédoanthracologie.. Biodiversité et Ecologie. Université de Picardie Jules Verne, 2016. Français. NNT: . tel-01429642

**HAL Id: tel-01429642**

**<https://theses.hal.science/tel-01429642>**

Submitted on 9 Jan 2017

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

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

# Thèse de Doctorat

## Mention Sciences Ecologiques *Spécialité écologie historique*

présentée à *l'Ecole Doctorale en Sciences, Technologie et Santé (ED 585)*

de l'Université de Picardie Jules Verne

par

**Thomas FEISS**

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Picardie Jules Verne

*Histoire et dynamique des forêts anciennes du nord de la  
France par l'étude des archives du sol.*

*Approche méthodologique et statistique de la  
pédoanthracologie.*

soutenue le 3 octobre 2016, après avis des rapporteurs, devant le jury d'examen :

**M. J.L. DUPOUEY, Directeur de recherche**  
**M<sup>me</sup> B. TALON, Maître de conférences**  
**M<sup>me</sup> M.C. BAL-SERIN, Maître de conférences**  
**M. J. BURIDANT, Professeur**  
**M. G. DECOCQ, Professeur**  
**M<sup>me</sup> H. HOREN, Maître de conférences**

**Rapporteur**  
**Rapporteur**  
**Examineur**  
**Examineur**  
**Directeur**  
**Co-directeur**



Cette thèse a été préparée au sein de l'unité de recherche Ecologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés (CNRS-FRE 3498 EDYSAN), 1 rue des Louvels 80037 Amiens Cedex.



*« Si vous voulez trouver les secrets de l'Univers, pensez en termes d'énergie, de fréquence, d'information et de vibration. »*

**- Nicolas TESLA**



# Remerciements

---

Je tiens tout d'abord à remercier mes directeurs de thèse Guillaume DECOQ et Hélène HOREN du laboratoire EDYSAN pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser un doctorat et avoir mis à ma disposition les moyens nécessaires pour travailler dans de bonnes conditions et m'avoir permis, à plusieurs reprises, de communiquer sur ma recherche par le biais de colloques internationaux. Merci également pour l'aide à la publication scientifique et à la rédaction de ce manuscrit.

Merci également à Boris BRASSEUR et Jérôme BURIDANT pour leur aide tant sur le terrain que dans les réflexions formulées.

Merci à Jonathan LENOIR pour sa précieuse aide statistique ainsi qu'à Emilie GALLET-MORON pour ses talents de cartographe mis à ma disposition.

Toute ma gratitude également à Claire DELHON, Marie-Claude BAL-SERIN et Vincent ROBIN pour leurs conseils et leur soutien dans le domaine de l'anthracologie.

Je remercie encore Henri BEAUGRAND, étudiant de BTS, ainsi que Marie COUELLIER, étudiante de Master, pour leur participation dans la collecte des échantillons et dans l'extraction des charbons.

J'adresse ma reconnaissance au Ministère de l'Enseignement et de la Recherche pour avoir financé mon Doctorat 3 années ainsi qu'à Mme Marie-France RUBIELLO, directrice adjointe du LEGTA des Vosges de Mirecourt, qui m'a confié un poste d'enseignant afin de financer mes 2 années supplémentaires de Thèse.

Enfin, un tendre merci à ma compagne Joanna BEAUMONT pour m'avoir soutenu, encouragé et aidé durant ces quelques cinq années de travail.



# Résumé

---

L'écologie historique retrace l'évolution des écosystèmes et paysages dans le temps tout en considérant l'influence des pratiques humaines. C'est une approche pluridisciplinaire à laquelle nous avons associé la pédoanthracologie particulièrement encline à reconstituer les écosystèmes forestiers anciens. Cependant, la question de sa représentativité écologique se pose afin d'évaluer sa contribution réelle à la compréhension des interactions homme-forêt passées dans le contexte de la forêt feuillue tempérée européenne. Par ce travail, notre objectif était de mettre au point un nouveau protocole d'échantillonnage doté d'une méthode d'analyse des données empruntée à l'écologie afin de s'assurer de la représentativité des données pédoanthracologiques quantitatives et taxonomiques.

En adéquation avec cet objectif, ce sont deux forêts anciennes du nord de la France qui ont été choisies : Compiègne et Saint Gobain. Nous avons exploré les archives anthracologiques de chaque massif en considérant l'impact stationnel sur la végétation. Trois types de sol ont ainsi été prospectés : podzols, cambisols et luvisols. Un protocole original a été établi, couplant une approche verticale, fosse pédologique (2.25 m<sup>2</sup>), à une approche horizontale s'appuyant sur un maillage tarière (1000 m<sup>2</sup>) des horizons superficiels du sol (0-20 cm). Pour mesurer la représentativité de l'échantillonnage, chaque litre prélevé a été traité individuellement. Les charbons en ont été extraits pour mesurer les anthracomasses dont l'autocorrélation spatiale a été testée par l'indice I de Moran. Pour Compiègne, les identifications taxonomiques ont été réalisées pour déterminer les richesses spécifiques. Nous avons utilisé les courbes de raréfactions et la partition additive de la diversité pour analyser la représentativité des efforts d'échantillonnage en nombre de litres et de charbons. Quinze fragments ont ensuite été sélectionnés et datés au radiocarbone et l'ensemble des résultats finalement confronté aux données archéologiques et historiques incluant les images Lidar.

Les résultats de l'autocorrélation spatiale indiquent que la distribution des charbons est aléatoire et hétérogène à plusieurs échelles de mesure. Les perturbations pédologiques et biologiques (bioturbation, répartition des arbres brûlés) sont probablement la cause de cette absence globale de patron spatial. Concernant la richesse taxonomique, elle augmente plus rapidement avec les tarières même si elles recueillent moins de taxons que les fosses. Les efforts d'échantillonnage sont insuffisants pour les fosses et doivent être adaptés en fonction des horizons. Seules les tarières ont atteint des seuils de représentativité. L'effort minimal d'échantillonnage est influencé par la méthode de prélèvement ainsi que le contexte pédologique. Nous constatons que l'emploi combiné des deux méthodes de prélèvements rend mieux compte de la diversité anthracologique que l'une ou l'autre appliquée séparément. Les prélèvements horizontaux sont pertinents dans la prise en compte de la variabilité spatiale et l'apport de nouveaux taxons enrichissant les inventaires des fosses. La stratégie d'échantillonnage pédoanthracologique se révèle cruciale car elle détermine les résultats obtenus. La synthèse des données apportées par les différentes approches, nous permet de situer la recolonisation forestière du territoire compiégnois durant le haut Moyen-Âge puis l'établissement d'un massif très ouvert de type chênaie-bétulaie façonné par les droits d'usages jusqu'à la fin du Moyen-Âge et enfin l'installation d'une forêt fermée de type hêtraie-chênaie du XVIII<sup>ème</sup> siècle jusqu'à nos jours. L'écologie historique peut alors employer la pédoanthracologie comme une source fiable d'informations venant parfaitement se corrélérer avec les hypothèses et scénarii des autres disciplines telles que l'histoire et l'archéologie dans la reconstitution de l'histoire des paysages et des écosystèmes forestiers du nord de la France et de l'ouest Européen.

**MOTS CLEFS :** Ecologie historique, Anthracologie, Courbe de raréfaction, Effort d'échantillonnage, Autocorrélation spatiale, Ecosystème forestier, Usage passé du sol, Impact de l'homme, Evolution de la végétation.

# Abstract

---

Historical ecology traces the evolution of ecosystems and landscapes in time while taking into consideration the influence of human practices. To this cross-disciplinary approach, we added another convergence in associating pedoanthracology which aims acutely at reconstructing ancient forest ecosystems. However, the question of its representativeness arises to assess the real contribution of pedoanthracology in understanding past human-forest interactions in context of European temperate deciduous forest. Through this work, our goal was to develop a new sampling protocol based on a data analysis methodology taken from ecology to ensure the representativeness of taxonomic and quantitative pedoanthracological data.

To be consistent with this purpose, two ancient forests of northern France were chosen: Compiègne and Saint Gobain. We explored the archives of each anthracological massif considering the pedological impact on vegetation. Three soil types have been prospected: podzols, cambisols and luvisols. An original mixed protocol was established combining a vertical methodology, soil pits (2.25 m<sup>2</sup>), with a horizontal procedure based on a 1000 m<sup>2</sup> auger grid in upper soil horizons (0-20 cm). To determine the representativeness of the sampling method, each liter was treated individually. Charcoals were extracted to measure anthracomasses from which spatial autocorrelation was tested by the Moran I Index.

For Compiègne, taxonomic identifications were achieved to evaluate the specific richness. We used rarefaction curves and the additive partitioning of species diversity to analyze the representativeness of sampling efforts in liters and charcoals. Fifteen fragments were then selected and radiocarbon dated. The whole results were subsequently confronted with archeological and historical data including Lidar imagery.

The results of spatial autocorrelation indicate that charcoals are randomly and heterogeneously distributed regardless of measurement scales. Soil and biological disturbances (bioturbation, distribution of burnt trees) may have caused this lack of overall spatial pattern. The taxonomic richness increases fastly with augers even though they contain less taxa than the pits. The sampling efforts are inadequate for the pits and must be specifically adapted by horizon. Only augers have reached representativeness thresholds. The minimal sampling effort is influenced by the sampling method as well as the pedological context. We observe that the combination of the two sampling techniques more efficiently reflects the anthracological diversity than either applied separately. Horizontal samplings are thus relevant to take into account the spatial variability and to supply new taxa enriching the anthracological assemblages of the pits. The pedoanthracological sampling strategy proves to be crucial since it affects the results. The synthesis of the data provided by the different disciplines enables us to establish three stages related to the Compiègnois territory: the forest recolonization during the early Middle Ages, the establishment of a large oak-birch open canopy forest shaped by the using rights until the late Middle Ages and finally a beech-oak canopy closure from the 18<sup>th</sup> century to nowadays. The historical ecology can then rely on pedoanthracology as a trustworthy source of information correlating with hypothesis and *scenarii* from other disciplines such as history and archeology in the reconstruction of landscapes and forest history in northern France and western Europe.

**KEYWORDS:** Historical ecology, Anthracology, rarefaction curve, Sampling effort, Spatial autocorrelation, Forest ecosystem, Past land use, Human impact, Vegetation evolution.

# Table des matières

---

Remerciements .....	7
Résumé.....	9
Abstract .....	10
Table des matières .....	11
Avant-propos.....	15
Chapitre I : Contexte scientifique.....	17
1. L'écologie historique .....	17
1.1 Origine et histoire.....	17
1.2 La démarche en écologie historique .....	18
1.3 Les sources de l'écologie historique.....	20
2. La pédoanthracologie : origine, histoire et principe .....	24
2.1 Origine et histoire.....	24
2.2 Les atouts de la pédoanthracologie .....	24
2.3 La pédoanthracologie : les contextes d'utilisations .....	25
2.4 Les défis de la pédoanthracologie.....	28
3. L'histoire de la forêt européenne.....	30
4. Les objectifs scientifiques.....	31
5. Références.....	33
Chapitre II : La zone d'étude.....	41
1 Le territoire picard.....	41
1.1 Le contexte humain et forestier .....	41
1.2 Le climat .....	42
1.3 Géologie.....	43
1.4 Pédologie .....	43
2. La forêt de Saint Gobain .....	44
2.1 Géologie.....	44
2.2 Histoire générale du massif.....	45
2.3 Sites d'études .....	51

3. La forêt de Compiègne .....	58
3.1 Géologie.....	58
3.2 Histoire générale du massif .....	59
3.4 Sites d'études .....	66
4. Références.....	74
Chapitre III : Pédoanthracologie : une approche méthodologique et statistique. ....	75
1 Influence of site history, soil type and sampling design in soil charcoal analyses. Sampling strategy for soil charcoal analysis. ....	77
1.1 Abstract .....	77
1.2 Introduction.....	78
1.3 Material and methods.....	79
1.4. Results .....	82
1.5 Discussion .....	86
1.6 Acknowledgments .....	89
1.7 References.....	89
1.8 Online Resources.....	93
2 Discussion complémentaire .....	98
3 Conclusion .....	102
Chapitre IV : Histoire et dynamique de la forêt de Compiègne .....	107
1 Historical ecology of lowland forests: does pedoanthracology support historical and archaeological data? .....	109
1.1 Abstract .....	109
1.2 Introduction.....	110
1.3 Study site .....	111
1.4 Material and methods.....	112
1.5 Results .....	115
1.6 Discussion .....	- 122 -
1.7 Conclusion .....	- 124 -
1.8 Acknowledgments .....	- 125 -
1.9 References.....	- 125 -
1.10 Online Resources.....	130
2 Conclusion .....	136
Chapitre V : Synthèse des résultats, conclusion et perspectives .....	139
Références.....	144
Table des figures.....	145

Liste des tableaux .....	149
Table des appendices .....	150
Appendice 1.....	152
Appendice 2.....	169
Appendice 3.....	170
Appendice 4.....	171
Appendice 5.....	176
Appendice 6.....	177



# Avant-propos

---

Un lien ancestral relie l'Homme à la forêt. A la fois terrifiante et merveilleuse, la forêt est le symbole de notre conscience cachée. Poètes, savants, hommes de lettres ou de Dieu, beaucoup se sont inspirés de la forêt pour comprendre le sens de la Vie (Debazac 1985, Crews 2003). Attaché à cette Nature par ce lien inaliénable, l'Homme utilise, parfois en bien et parfois en mal, ce patrimoine universel.

Présente sur tous les continents de notre Terre, la forêt recouvre plus du tiers des terres émergées soit 4 milliards d'hectares<sup>1</sup>. Avec une perte de 2 milliards d'hectares depuis la fin de la dernière glaciation, la forêt est soumise aux conditions environnementales, aux changements climatiques et plus récemment aux influences humaines (Foster *et al.* 2003). Elle existe sous de nombreuses formes (caduque, sempervirente, mixte) et s'adapte parfaitement à des conditions de vie très variées (tropicale, méditerranéenne, tempérée, boréale).

Le regard porté sur cette entité Forêt varie en fonction des peuples et des cultures (Crews 2003). En **Europe** elle est présente, de manière hétérogène, sur le tiers du territoire (taux de boisement de 31%), soit 72.5 millions d'hectares<sup>2</sup>. Cette forêt a largement colonisé le territoire européen lors de la reconquête postglaciaire mais s'est vue, dès le Néolithique, exploitée et organisée par les sociétés humaines (Kirby & Watkins 1998). La diminution de la forêt européenne s'est faite en corrélation avec le développement humain, les besoins accrus en nourriture, en énergie, en matériaux de constructions etc. En revanche, l'Europe est une des rares terres où, depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle, la surface forestière augmente significativement. L'abandon des terres agricoles, les changements de pratiques et la reconquête naturelle et/ou assistée de la forêt en constituent des explications.

Le même constat peut être fait en ce qui concerne la **forêt française**. Elle a connu globalement la même évolution depuis la dernière ère glaciaire. Elle fut également façonnée par l'homme depuis l'âge du fer. Sa surface a varié dans le temps avec de large défrichement à l'Antiquité, suivis parfois d'une structuration du paysage en centuries (0.5 ha) où s'édifiaient les *villae* lors de l'occupation romaine, des recolonisations forestières durant les creux démographiques du Moyen-Âge (famines, guerres, invasions) et enfin, de nouveaux défrichements du XIII<sup>ème</sup> siècle au XIX<sup>ème</sup> avec l'organisation des campagnes et la croissance démographique (Grosjean 1980). En revanche, depuis l'exode rural, du XIX<sup>ème</sup> à nos jours, on assiste à une nouvelle recolonisation forestière avec la hausse de sa surface (de 46%), la forêt atteignant aujourd'hui les 16.5 millions d'hectares soit 30% du territoire national<sup>3</sup>, contre seulement 9 millions d'hectares en 1830, période que l'on nomme le minimum forestier (Rousseau 1990, Cinotti 1996, Koerner *et al.* 2000).

---

<sup>1</sup> <http://www.fao.org/>

<sup>2</sup> <http://www.europarl.europa.eu>

<sup>3</sup> <http://www.ign.fr/>

La forêt française a donc subi de grandes mutations durant les siècles passés tant au niveau de son occupation qu'au niveau culturel. Elle est riche de par son histoire mais également en raison de sa diversité conférée par de nombreuses zones biogéographiques présentes sur le territoire métropolitain : méditerranéenne, atlantique, continentale et alpine.

Les traces du développement des sociétés de l'âge du fer à l'antiquité prouvent que les forêts étaient très peu présentes sur le territoire ou du moins sous une forme beaucoup plus ouverte avec une plurifonctionnalité marquée : e.g. sylviculture, agriculture et habitats sur une même parcelle. Les pratiques anciennes étant toujours visibles de nos jours sur la fertilité des sols et la biodiversité forestières par exemple (Hermy *et al.* 1999, Bellemare *et al.* 2002, Jussy *et al.* 2002).

Le mouvement de la forêt dans le temps, lié à l'homme, a donné naissance à la notion de forêt ancienne. Ce terme, qui traduit une présence avérée depuis au moins deux siècles, est de plus en plus utilisé depuis dix ans et permet de distinguer les forêts récentes de leurs aînées. En France, c'est par la présence d'un massif forestier sur la carte de l'Etat-Major, datant du XIX<sup>ème</sup> siècle, qu'une distinction est possible entre ces deux types d'état boisé. En l'occurrence, si elle y est figurée, il s'agira d'une forêt ancienne.

Cette thèse s'est en particulier intéressée aux forêts anciennes de plaine à travers deux exemples situés dans le Nord-Ouest de la France. Elle vise à mieux comprendre l'évolution de ces espaces boisés au cours de leur histoire à une échelle pluri-séculaire en relation avec leur occupation et les usages humains. Elle repose principalement sur l'étude des archives végétales conservées dans les sols sous forme de charbon de bois issus de feux anciens et s'articule autour de cinq chapitres. Le **premier chapitre** s'attachera à présenter le contexte scientifique de l'écologie historique et les méthodes sur lesquelles elle s'appuie. Parmi ces méthodes, nous nous intéresserons plus particulièrement aux avantages et limites actuelles de la pédoanthracologie. L'histoire des forêts européennes sera ensuite abordée. Le **second chapitre** présentera notre zone d'étude, les caractéristiques naturelles des deux massifs étudiés ainsi que leurs spécificités historiques à échelle pluri-séculaire. Ce chapitre s'achèvera par une présentation des sites étudiés dans ces deux massifs. Les **chapitres III et IV** sont constitués de deux articles scientifiques soumis à des revues internationales. Dans le troisième chapitre, nous nous appuierons sur une analyse statistique de la distribution des charbons dans le sol et de la diversité pour proposer une modification protocolaire et analytique de la pédoanthracologie, dans le but d'une plus vaste utilisation en écologie historique. Le quatrième chapitre comparera l'image anthracologique à l'image archéologique et historique d'une forêt ancienne de plaine du nord de la France : la forêt de Compiègne. Une synthèse des résultats suivie d'une conclusion générale, en **chapitre V**, viendra ensuite répondre aux attentes de l'état de l'art tout en proposant des perspectives à ce travail de recherche<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> *Nota bene* : un troisième article, publié dans une revue francophone de rang A, est placé en appendice 1. Il a été le premier fruit de la thèse et a été établi à partir des résultats provisoires de l'époque.

# Chapitre I : Contexte scientifique

---

## 1. L'écologie historique

### 1.1 Origine et histoire

Apparue au courant du XX<sup>ème</sup> siècle, l'écologie historique est définie de diverses manières selon le continent ou la spécialité du chercheur qui l'emploie (Szabo 2015). L'écologue anglais Rackham Oliver (1967) la considère comme étant « l'interprétation des facteurs naturels et artificiels qui influencent le développement de la végétation actuelle ». Pour Deléage & Hémerly (1989), respectivement physicien et historien français, il s'agit de « l'étude de la relation entre les actions de l'homme et son environnement dans le temps ». L'Américain et dendrologue Swetnam (1999) la voit comme « l'utilisation de la connaissance historique pour gérer les écosystèmes » et les Suisses Gimmi & Bugmann (2013), tous deux écologues, comme « une analyse scientifique visant à comprendre l'histoire d'un écosystème ». Ces différents auteurs s'accordent sur le fait que l'écologie historique consiste à **comprendre le fonctionnement naturel d'un écosystème ou d'un paysage, son développement et son évolution en y intégrant l'influence des pratiques passées de l'homme**. Le paysage est un ensemble complexe à appréhender. Hétérogène, il est composé de plusieurs écosystèmes, organisés par les activités humaines (Girel 2006). La nature même d'un paysage ou d'un écosystème est la résultante de la succession temporelle d'évènements subis qui l'ont modifiée temporairement ou définitivement. Evènements naturels, car la nature est éternellement changeante, ou anthropiques (Baudry & Burel 1999). L'écologie historique concerne donc **l'étude de cette relation interdépendante qui existe entre l'évolution de la nature et de la culture humaine**. Elle regroupe quatre champs d'études que sont l'histoire, l'écologie, la géographie et l'anthropologie ce qui fait d'elle une discipline « parapluie » car pluri et interdisciplinaire (Szabo 2015).

Le terme d'écologie historique fut utilisé pour la première fois en 1940 par Grainger au Royaume-Unis. Il étudia l'évolution de la richesse spécifique en champignons entre un inventaire ancien et sa propre campagne de relevé. Entre 1960-1980 c'est en Angleterre (Peterken 1981, Rackham 1980) que va se développer ce champ d'étude. Les résultats prometteurs publiés par les Britanniques vont ensuite inspirer les chercheurs américains (Foster 1988 et 2000, McDonnell & Pickett 1993, Motzkin *et al.* 1999) car de nombreuses remises en question apparaissaient en lien avec l'impact des pratiques d'aménagement du territoire et d'exploitation des ressources naturelles constaté sur le milieu naturel. A la fin du XX<sup>ème</sup> et durant le XXI<sup>ème</sup> siècle, l'écologie historique va prendre une envergure internationale avec notamment Hermy Martin (1994), scientifique belge spécialisé dans l'écologie forestière de la nature et des paysages, qui publiera un article fondateur de la discipline, ce qui permettra sa rapide propagation dans bon nombre de pays dont la France.

L'humain est envisagé en écologie historique comme un important facteur biotique (Godwin 1934, McDonnell & Pickett 1993, Vitousek 1997) et son influence sur les milieux est majeure. En effet, depuis des milliers d'années l'homme façonne et aménage son environnement pour ses besoins propres : lieu de vie, de culture, d'exploitation des ressources naturelles, de pâture ou encore de sylviculture. Ce phénomène s'accélère depuis le XVII<sup>ème</sup> siècle, certains parlant même d'une nouvelle époque géologique : l'anthropocène (Steffen 2005, Sanderson *et al.* 2002). Mais cette relation homme-environnement est complexe car chacun influence l'autre, par ses actions pour l'un et par ses conditions abiotiques pour l'autre.

L'écologie historique est rapidement devenue une discipline internationale avec des enjeux communs présents sur des continents et des milieux très différents. Allant d'écosystèmes fermés comme la forêt (Bürgi & Russell 2001) ou ouverts comme la prairie (Malin 1984) en passant par les milieux aquatiques marin (Nadon *et al.* 2012) et d'eau douce (Haidvogel *et al.* 2013). En Belgique par exemple, De Keersmaecker *et al.* (2011) ont démontré, en contexte de forêt ancienne, la relation entre les opérations de gestion forestière, à savoir les coupes à blanc engendrées par l'exploitation de la futaie et de la gestion du sous-étage en taillis, et le développement d'une flore vasculaire spécifique de milieux ombragés. Dutoit *et al.* (2003), en contexte de coteaux calcaires normands, ont prouvé l'influence des pratiques anciennes, de ces deux derniers siècles (culture, viticulture, prairie, jachère), sur la composition floristique et la richesse spécifique. De l'autre côté de l'Atlantique, dans le Colorado par exemple, Veblen & Lorenz (1986) ont étudié la recolonisation forestière et la succession des différentes espèces après l'arrêt des fortes perturbations minières et de la surexploitation sylvicole, la résilience de ces écosystèmes étant globalement difficilement atteinte. En Nouvelle-Zélande, Trustrum *et al.* (1988) ont exploré la question de la relation entre les glissements de terrain liés à une déforestation ancienne (90 ans) et la reconstitution pédologique avec, notamment, l'épaisseur de sol qui est, au final, corrélée à l'âge de ces éboulis. Ces quelques exemples d'auteurs pour illustrer l'internationalité et toute la palette thématique que l'on peut rencontrer en écologie historique.

## 1.2 La démarche en écologie historique

Les caractéristiques floristiques, faunistiques et pédologiques actuelles d'un écosystème, sont la résultante de deux facteurs : (i) les conditions naturelles, telles que la nature géologique, le climat, la topographie et (ii) l'homme qui, pour sa survie et son développement, organise son territoire et en exploite les ressources.

Pour comprendre un milieu actuel et prévoir les conséquences de nos modes de gestion et d'exploitation modernes sur les écosystèmes de demain, la prise en compte des particularités et des effets des pratiques anciennes est une clef essentielle.

Le cœur de l'écologie historique réside dans la vision, la prévision et la compréhension de la stabilité et de la résilience d'un écosystème qui, à l'image du terme « de paysage humanisé » (Farina 2005), peut être appelé en réalité « écosystème anthropisé ». Cette résilience ne pouvant être évaluée qu'à condition de pouvoir dater les contraintes humaines et le stress qu'elles ont engendré sur le milieu. La limite principale est alors cette disponibilité des données historiques dans les différentes sources qu'explore l'écologie historique.

On peut ainsi définir les trois principales caractéristiques de la discipline grâce aux travaux de Girel (2006), Bürgi & Gimmi (2007), Szabo & Hédli (2011) et Szabo (2015).

**(i) Identifier les usages anciens.**

La recherche en écologie historique permet de retrouver la trace des pratiques anciennes grâce à la pluridisciplinarité. Les témoins de ce passé peuvent être un reliquat de microrelief, une modification des conditions physico-chimiques du sol ou la présence de marqueurs paléo-écologiques caractéristiques. Glatzel (1990) a mesuré l'effet de la récolte annuelle de la litière forestière sur l'acidification des sols forestiers suisses, par le biais du taux d'azote et du stock de carbone. Le pH diminuant fortement en raison de cette exportation de matière organique. Cette pratique existait au XVII<sup>ème</sup> siècle et consistait à récolter la litière pour l'élevage des animaux pendant la révolution agricole. Dupouey et al. (2002) établissent la connexion entre l'écologie végétale et l'archéologie. Ils démontrent l'héritage à très long terme d'usages très anciens des terres comme l'agriculture, toujours visible sur les cortèges floristiques actuels. La paléoécologie, plus particulièrement la palynologie, a aussi été employée pour reconstruire des biotopes et des environnements passés et déceler les indices des pratiques de l'homme sur les séquences palynologiques telle que le déboisement, la culture ou encore l'écobuage (Etienne *et al.* 2013, Birks & Birks 1980, Manten 1967). L'on peut également faire référence à l'irrigation des terres, ou au contraire au drainage des eaux, qui nécessitaient des aménagements techniques importants et qui sont encore visibles de nos jours grâce à l'emploi de l'outil LIDAR, Light Detection and Ranging (Orengo *et al.* 2014).

**(ii) Mesurer l'influence des interactions homme-nature passées sur l'écosystème actuel.**

A de nombreuses reprises un lien a été décelé entre les usages anciens des sols (e.g. agriculture, sylviculture) ou les pratiques anciennes dans un même système végétal (e.g. intensité d'éclaircie en forêt, choix des essences objectives) et la biodiversité actuelle d'un écosystème. Les travaux de Dambrine *et al.* (2007), Dupouey *et al.* (2002) et Verheyen *et al.* (1999) ont démontré l'impact à long terme des formes d'agriculture ancienne, remontant à l'Antiquité pour les deux premiers et au Moyen-Âge pour le dernier, sur la richesse spécifique, les communautés végétales et les propriétés du sol en forêts de Tronçais, des Vosges et de Belgique respectivement. La réaction du cortège floristique aux changements d'usages passés a également été étudiée par Verheyen *et al.* (2003) mais en se fondant cette fois sur les traits de vie des espèces. Dans les Appalaches, Fraterrigo *et al.* (2005) mesurent également des changements dans les nutriments du sol 60 ans après l'arrêt de la pratique du pâturage ou de la récolte de bois. De nombreuses recherches sur les carabes ont également mis en évidence la relation forte entre les perturbations du milieu ou les changements de pratiques et l'apparition ou la disparition de certains taxons de carabidés (Kötze *et al.* 2011).

Les pratiques humaines laissent donc des traces irréversibles, à l'échelle du temps humain, sur leurs milieux de ressources. C'est d'ailleurs dans cette seconde voie de l'écologie historique qu'a émergé le terme d'ancienneté d'un écosystème (e.g. Hermy 1999) défini par un système végétal présent aujourd'hui et stable dans le temps depuis aux moins 2 siècles. On oppose à ce terme celui d'écosystème récent (ou jeune), présent sur moins de 2 siècles. L'ancienneté, validée par les documents historiques, est également repérable en milieux forestiers par les communautés végétales qui s'y développent. De nombreux auteurs, en Belgique (Hermy 1994), en Allemagne (Wulf 1997) ou en France (e.g. Dupouey *et al.* 2002, Decocq 2004) ont mis au point des listes d'espèces propres aux milieux anciens. L'échelon

des 200 ans est d'ailleurs nécessaire à l'apparition de cette flore ancienne dans les forêts récentes.

Les autres termes employés à propos des forêts, en l'occurrence primaire et vierge, sont spécifiques aux forêts n'ayant jamais été déboisées ou influencées par l'humain. La forme vierge étant très relative puisque l'homme influence l'ensemble de sa biosphère, directement (agriculture, urbanisation, gestion) ou indirectement (dépôts atmosphériques, pollution de l'air et/ou de l'eau) (Bouvarel 1984, Thimonier *et al.* 2012).

### **(iii) Anticiper les effets des usages actuels et futurs.**

L'écologie historique permet d'appréhender les effets locaux et globaux des activités passées sur le milieu naturel. Identifier les effets néfastes de telle ou telle pratique peut aider à éviter de commettre certaines erreurs dans nos systèmes actuels. Par exemple, Glatzel (1990) prouve qu'une exportation massive de la biomasse forestière conduit inmanquablement à une acidification du sol, diminuant ainsi sa qualité et sa productivité. Les actuels systèmes forestiers de taillis à très courte rotation servant à fournir du bois énergie ne procurent alors pas les conditions requises pour une gestion durable des forêts et des sols.

Il est également essentiel d'inclure les paramètres des changements globaux que nous sommes à même de pouvoir aujourd'hui identifier, mesurer et dont nous pouvons prédire l'ampleur (Harris *et al.* 2006). Ces changements futurs peuvent être climatiques, énergétiques (nouvelles énergies renouvelables) et pratico-culturelles (nouvelles techniques d'exploitation des terres agricoles) et auront inévitablement des répercussions sur les écosystèmes naturels.

## **1.3 Les sources de l'écologie historique**

Les sources consultées sont nombreuses car l'écologie historique s'établit comme une démarche holistique (Girel 2006), donc pluridisciplinaire. Reliant les sciences humaines et les sciences de la vie, l'anthropologie et l'écologie (Szabo 2015), les informations utilisées proviennent de ressources multiples.

### **(i) L'héritage de l'homme**

La transmission des informations à travers les générations et les différentes formes qu'elle peut prendre constitue une base d'informations essentielles en écologie historique.

Les **plans**, **cartes anciennes** et **photographies aériennes** renseignent sur les usages et occupations des sols passés. Par exemple, pour la Suède, les travaux de Cousins (2001) exposent une analyse de l'usage des sols depuis les XVII<sup>ème</sup> et XVIII<sup>ème</sup> siècles à partir des anciennes cartes cadastrales ainsi que des photographies aériennes. Il précise l'absolue nécessité d'une vectorisation corrigée du cadastre ancien rendant alors possible le suivi des changements d'usages des terres ou inversement de la stabilité d'un écosystème dans le temps. Au niveau français, Vallauri *et al.* (2012) ont vectorisé l'ensemble des cartes d'arpentages de Cassini (XVIII<sup>ème</sup> siècle) du territoire métropolitain. L'objectif de ce travail a été de déterminer l'usage des sols et l'ancienneté des forêts à partir du XVIII<sup>ème</sup> siècle afin d'en étudier en aval le fonctionnement écologique. Toutefois la limite de précision à l'échelle locale et régionale de Cassini rend parfois délicate la comparaison avec les représentations actuelles. La carte d'Etat-Major offre en revanche une meilleure précision à toutes les échelles d'observations. Elle date du XIX<sup>ème</sup> siècle, période du minimum forestier

(Dupouey *et al.* 2007). La **toponymie** témoigne dans bon nombre de cas de l'occupation ancienne d'une terre. Renseignée en France sur les cartes éditées par l'Institut Géographique National, elle est facilement accessible. Feiss *et al.* (2011) et Vauchelet (2014), utilisent en plus des cartes anciennes, la toponymie pour retrouver la trace des Quarts de Réserves des forêts communales de Lorraine. Cette ancienne mesure sylvicole, du XVI<sup>ème</sup> au XIX<sup>ème</sup> siècle, imposait aux propriétaires forestiers de mettre en réserve un quart de la surface forestière. Le mode de gestion et d'exploitation, proche de la Futaie régulière, était alors différent des traditionnelles coupes affouagères, taillis simple ou mélange taillis-futaie. Par la localisation de cette modalité forestière, une comparaison des deux types de gestions a pu être effectuée au niveau botanique et pédologique.

La recherche en **archives** est évidemment une ressource inévitable dans les approches d'écologie historique. Dans la limite de leur état de conservation, elles permettent de fournir des données cartographiées (cartes anciennes, plans) mais également manuscrites (registres, livre de comptes) ou imprimées (photographies). Il s'agit alors d'informations précieuses sur les usages passés et sur l'évolution des pratiques dans le temps (Sheail 1980, Rymer 1974). Les archives présentent souvent des périodes de vides d'informations surtout dans les contrées où la transmission des informations se fait de manière orale. Dans ce cas, c'est la **mémoire** des hommes et femmes qui peuplent ces terres qui pourra combler ces vides (Szabo 2015).

C'est enfin l'**archéologie** qui peut révéler des pans d'histoire utile en écologie historique notamment pour la période du Néolithique jusqu'à l'Antiquité dont on ne dispose pas de ressources écrites (Egan & Howell 2005). En lien avec cette discipline, les apports du système de détection par laser aéroporté **LIDAR** (*Light Detection and Ranging*) sont considérables. En milieu forestier, cette technique permet certes de (i) mesurer la hauteur des arbres, d'où son utilisation en sylviculture (programmation des travaux et coupes d'amélioration) mais surtout (ii) de déterminer avec précision la hauteur du sol afin d'observer le microrelief. Ces microdéformations topographiques sont particulièrement difficiles, voire impossibles, à détecter en prospection pédestre. De nombreuses structures humaines (mise en culture, drainage) et archéologiques (habitat, parcellaire, voie de communication) sont mises au jour, témoignant d'usages anciens des sols, et ensuite intégrées dans les démarches d'écologie historique.

La technique LIDAR a fourni des résultats particulièrement intéressants en forêt de Bade<sup>5</sup> (Sittler & Hauger 2004), de Haye<sup>6</sup> (Dupouey *et al.* 2007, Georges-Leroy *et al.* 2011) et de la Braconne (Vautier *et al.* 2014)<sup>7</sup>. La figure 1 permet de visualiser le rendu en 3D du modèle numérique de terrain, obtenu à partir des données LIDAR. Apparaît très nettement un relief de type parcellaire agricole (double ligne de murets, habitats sous forme d'enclos, bâtiments divers), témoignage d'un ancien système agraire traditionnel datant de l'occupation romaine, conservé aujourd'hui sous couvert forestier (Figure 1b). Autre exemple parlant, la figure 2 qui laisse apparaître avec précision la très forte abondance des structures circulaires de types meules de charbonniers. Ces deux exemples viennent illustrer la découverte de vestiges archéologiques datant de deux époques différentes : l'Antiquité et le Moyen-Âge.

<sup>5</sup> Allemagne, Land de Bade-Wurtemberg

<sup>6</sup> France, département de Meurthe-et-Moselle (54)

<sup>7</sup> France, département de la Charente (16)

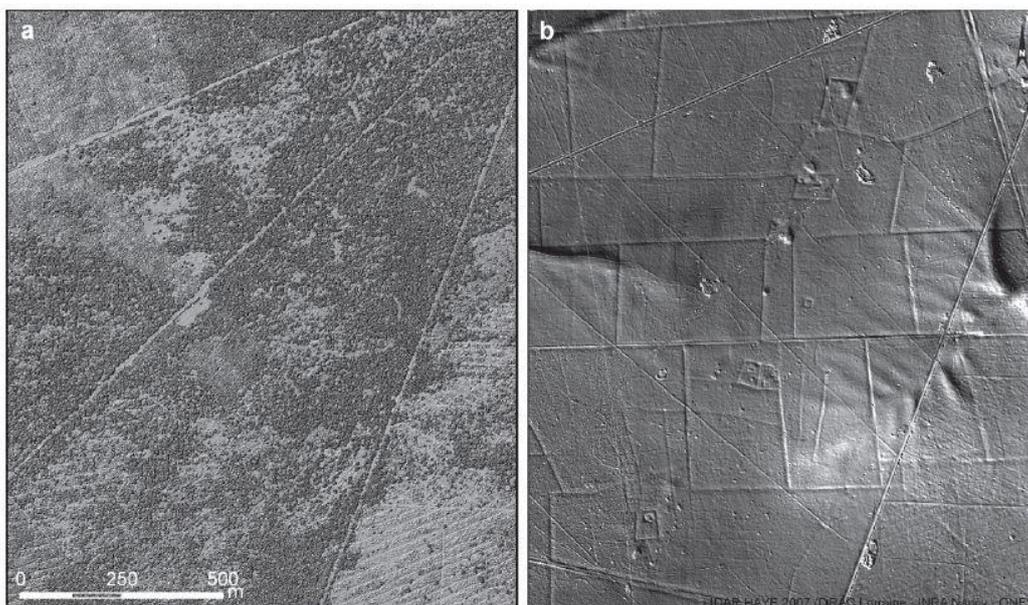


Figure 1 : Visualisation du modèle d'élévation a) avec la végétation et b) sans la végétation (Georges-Leroy *et al.* 2011)

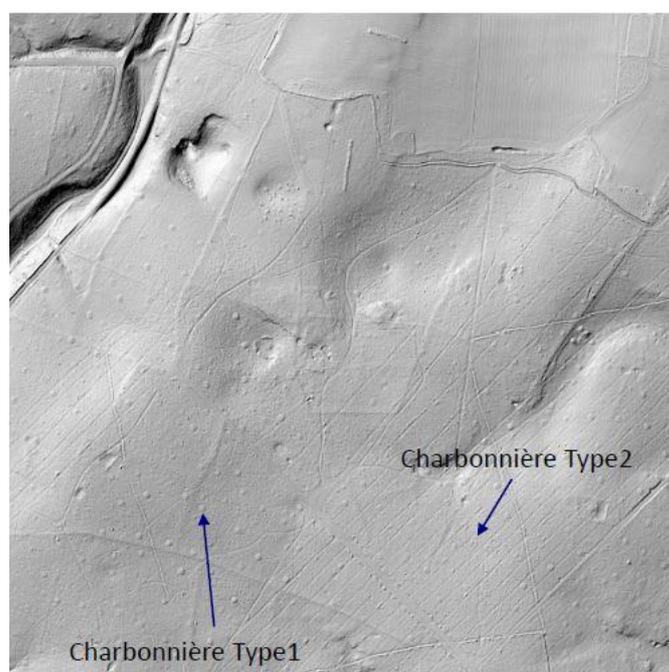


Figure 2 : Visualisation des anciennes charbonnières en forêt de Braconne (Vautier *et al.* 2014)

### (ii) Les impacts sur l'écosystème

Les usages anciens ainsi que les événements naturels ou anthropiques passés laissent des traces sur les écosystèmes et différentes disciplines sont employées pour les retrouver.

La **dendroécologie**, par l'observation des cernes des arbres mesurés à différentes dates, permet d'évaluer la baisse ou l'augmentation de la croissance des arbres en y associant les modifications climatiques et le régime des perturbations dues à la gestion forestière (Fritts & Swetnam 1989). Est ainsi obtenu un comparatif de la croissance des forêts actuelles *versus* forêts passées. La **botanique** appliquée aux écosystèmes forestiers offre une détermination de l'ancienneté d'un massif par les espèces indicatrices (Dzwonko & Loster 1989, Wulf 1997, Bossyut *et al.* 1999) révélatrices de l'âge du boisement ou de vestiges archéologiques

(Decocq 2004). La flore est également un indicateur fort d'utilisations anciennes des sols car les terres agraires du passé (Antiquité, Moyen-Âge) recouvertes aujourd'hui de forêts proposent des cortèges floristiques riches en taxons neutrophiles et nitrophiles. Taxons qui seront absents ou moins fréquents des sols porteurs d'un continuum temporel forestier. Cette modification s'accompagne de caractéristiques physico-chimiques spécifiques des sols repérables grâce à la **pédologie**. Citons par exemple les valeurs de pH, Phosphore et isotope  $^{15}\text{N}$  qui augmentent en contexte d'anciennes cultures (Dambrine *et al.* 2007, Dupouey *et al.* 2002). La **MOS** (Matière Organique des Sols), porteuse de fractions non minéralisées qui réagissent à la spectroscopie proche infrarouge, témoigne de la végétation ancienne traduisant les usages anciens (Ertlen *et al.* 2010). Cette nouvelle technique permet d'accéder à des archives pédologiques qui étaient jusque aujourd'hui insoupçonnées. Dans le même esprit, Schlumbaum *et al.* (2008) proposent de se servir des restes des végétaux conservés dans les sédiments naturels et/ou archéologiques (tissus, **ADN**) afin d'identifier quelles espèces sont conservées et ainsi reconstruire les systèmes agricoles anciens (culture, prairie, forêt). Toujours en lien avec le sol, Lavrieux *et al.* (2012) obtiennent des témoignages des changements d'usages des sols par l'analyse des **biomarqueurs moléculaires** conservés dans les sédiments. Des assemblages de marqueurs spécifiques sont reconnus comme caractéristiques d'usages ou de successions végétales spécifiques. Les **phytolithes** peuvent également être étudiés dans les sédiments naturels ou anthropiques ainsi que sur le mobilier archéologique. Ces concrétions siliceuses sont étroitement liées aux espèces végétales et à leur physiologie. Il s'agit encore d'un autre témoignage des environnements et des usages passés tel que les activités agricoles par exemple (Delhon 2003).

Dans les disciplines qui permettent de retrouver les traces des usages et paysages passés citons encore la discipline de l'**archéo-botanique** qui s'intéresse aux archives déposées dans les sédiments archéologiques et pédologiques. Elle comprend la carpologie (étude des graines fossilisées), l'anthracologie (étude des charbons de bois) et la **palynologie** (étude des pollens). Cette dernière est la plus répandue en écologie historique car elle permet un lien direct entre séquence palynologique, évolutions climatiques et influence de l'homme à grande échelle (Brun 2011, Russel 1979). L'**anthracologie**, courante en archéologie, devient la **pédoanthracologie** en écologie et en paléo-écologie (Carcaillet & Thinon 1996). Même si cette dernière est peu utilisée en écologie historique, jusque aujourd'hui, Dambrine *et al.* (2007) démontrent son intérêt à travers ses travaux en forêt de Tronçais. En se fondant sur l'abondance des charbons dans les sols corrélés aux vestiges de parcelles antiques ils ont pu confirmer l'usage du feu pour déboiser et entretenir les milieux agricoles durant l'Antiquité.

La thèse présentée ici s'emploie justement à intégrer la pédoanthracologie et les informations qu'elle peut délivrer dans une démarche d'écologie historique.

## 2. La pédoanthracologie : origine, histoire et principe

### 2.1 Origine et histoire

L'étude des charbons de bois issus de feux, plus particulièrement l'identification taxonomique des particules carbonisées, est une discipline jeune puisque utilisée scientifiquement depuis près de 60 ans en archéologie et seulement depuis 30 ans en paléo-écologie. Pour chacun de ces deux domaines, l'analyse des débris végétaux carbonisés est réalisée selon des protocoles spécifiques. Pour l'archéologie, les prélèvements sont adaptés à la nature des vestiges (Chabal 1988). En milieu naturel en revanche, c'est la création d'une base méthodologique par Carcaillet & Thinon en 1996, inspirée des travaux de Thinon (1978, 1992), qui peut être considérée comme le point de départ de la pédoanthracologie.

L'anthracologie a été développée grâce à l'invention de la méthode de datation au carbone 14, mesure en spectrométrie de masse par accélérateur (AMS), par Willard Frank Libby (prix Nobel de chimie en 1960). Cette découverte majeure a permis de replacer dans le temps les restes carbonisés des végétaux, aussi bien en contexte archéologique que naturel.

Les premières mentions de reconnaissance taxonomique de charbons de bois (Thinon 1992) datent du XIX<sup>ème</sup> siècle et proviennent de sites archéologiques (e.g. Fliche 1886). L'anthracologie s'est ensuite développée au début du XX<sup>ème</sup> siècle en Europe et en recherches archéologiques. A cette époque il n'y avait aucune méthodologie établie en ce qui concerne l'identification des charbons et les outils étaient précaires. Des années 30 aux années 60, diverses approches méthodologiques ont été expérimentées et jusque dans les années 80, les identifications des charbons se faisaient sur lame mince au microscope diascopique. Dans la même période, la technique épiscopique a été éprouvée et largement préférée car plus simple d'utilisation, les charbons étant quasiment observables dès leurs découvertes sur le terrain. La première véritable méthodologie paléo-écologique fondée sur l'identification des charbons de bois provenant de sols forestiers fut mise au point par Thinon en 1978. Les principes de la pédoanthracologie étaient posés. La méthode fut officialisée avec la thèse de ce dernier en 1992 puis la publication scientifique, en 1996, de Carcaillet & Thinon. Ceux-ci ont retracé l'évolution de la limite supérieure des arbres de la vallée de la Maurienne (Savoie) à partir des charbons contenus dans les sols tout en instituant les bases techniques. Le protocole consiste à extraire, dans une fosse pédologique, environ 10 litres de terre par horizon ou niveau pré-défini, soit 5 à 15 kg. Les charbons, de 0.4 mm de taille minimale, sont extraits de cette terre en laboratoire par un système de flottaison et de tri manuel avant de faire l'objet d'une observation au microscope épiscopique afin d'en déterminer les genres et/ou espèces.

### 2.2 Les atouts de la pédoanthracologie

Les charbons de bois, et principalement les macro-charbons (> 0.8 mm), sont potentiellement présents dans tous les sols pouvant porter un écosystème végétal. Cependant, à la différence de la palynologie, l'autre discipline majeure de l'archéobotanique, on rapporte très rarement une stratification de l'âge des charbons en fonction de la profondeur dans le sol, et cela quelle que soit la nature et le fonctionnement du sol (e.g. Carcaillet 2001). Les seules mentions d'une structuration verticale des datations au

radiocarbone de fragments proviennent de séquences de sédimentation terrestre de type colluvion (Robin *et al.* 2011). La distribution des charbons est une variable très complexe car soumise à de nombreuses influences telles que la dynamique des sols (bioturbations, lessivage, chablis) (Langhor *et al.* 2000), la gravité (transport par les eaux de ruissellement) (Carcaillet & Thinon 1996), et l'intensité ainsi que le type d'incendie (Asselin *et al.* 2005). S'agit-il d'un feu de bois vivant ou de bois mort ? D'un feu de litière, de sous-étage ou de canopée ? Tant de paramètres qui ne sont pas renseignés par l'antracocénose du sol (Delhon 2005).

Concernant la discipline phare de l'archéo-botanique, à savoir la palynologie, on peut remarquer que les profils palynologiques obtenus à partir de dépôts sédimentaires lacustres et/ou tourbeux offrent certes une stratigraphie et un témoignage fiable des évolutions végétales mais à une résolution spatiale qu'il est très difficile d'interpréter. En effet, les pollens de certaines espèces peuvent être transportés sur une très longue distance ou inversement être piégés très localement. De plus, ces prélèvements palynologiques présentent souvent la possibilité d'étudier les micro-charbons (< 0.4 mm), stratigraphiés et piégés également dans les sédiments, mais ces marqueurs sont également soumis à l'aléa des transports aériens. Autre particularité : ces deux marqueurs paléo-environnementaux, que sont les pollens et les micro-charbons, sont soumis aux paramètres de température et d'oxygène pour être conservés (e.g. Lowe 1982). Seuls les sédiments offrent des conditions froides et anaérobiques, idéales pour la préservation à long terme des restes végétaux. Quant aux macro-charbons, ils se conservent très bien et durablement dans les sols et cela quelles que soient les conditions du milieu (de La Fontaine *et al.* 2011).

Ainsi, les macros charbons, qui sont le fondement même de la pédoanthracologie, jouissent de trois avantages majeurs dans la reconstitution des environnements passés :

(i) Ils peuvent être identifiés avec précision et cela grâce à la bonne préservation des structures anatomiques du bois lors de la carbonisation. Les nombreux travaux xylogiques, atlas du bois vivant (Schweingruber 1990a, 1990b), bases de données en ligne (<http://www.woodanatomy.ch/>) peuvent être employés dans la reconnaissance des charbons. De plus, la réalisation d'une anthracothèque à partir de la carbonisation des espèces ligneuses locales en laboratoire permet de constituer une collection de références fiables et non dégradées par les processus pédologiques.

(ii) Le charbon étant principalement constitué de carbone, sa conservation peut se faire durant plusieurs millénaires et cette nature chimique en fait le candidat idéal pour la datation au C<sup>14</sup>.

(iii) La résolution spatiale des profils pédoanthracologiques est très fine car les charbons d'une taille supérieure à 0.4 mm ne peuvent être transportés sur de longues distances et témoignent donc d'une végétation ligneuse locale (Clark *et al.* 1988, Lynch *et al.* 2004, Peters & Higuera 2007, Dutoit *et al.* 2009, Touflan *et al.* 2010).

## 2.3 La pédoanthracologie : les contextes d'utilisations

L'archivage des charbons de bois dans les sols est systématiquement relié aux incendies passés et aux essences ligneuses carbonisées. Bien que les méthodes de prélèvements soient semblables entre les différentes études, les zones bioclimatiques

prospectées et les objectifs recherchés peuvent être de différentes natures, souvent conjointement abordés dans les publications :

**(i) Les recherches sur les changements d'aire de distribution des espèces.**

La question des changements d'aire de distribution a principalement été abordée dans les contextes de forêts d'altitude et de refuge glaciaire. Dans les Pyrénées, Cunill *et al.* (2012) ont exploré le gradient 2000-2600 m et ont pu retracer une évolution forestière depuis 11000 ans BP jusqu'à 2400 m d'altitude. Le paysage est aujourd'hui radicalement différent puisque la limite arborée se trouve à 2000 m et que les pâtures occupent les sommets. Cette thématique a beaucoup été étudiée dans les Alpes (e.g. Carcaillet *et al.* 2007-1996, Ali *et al.* 2005). Carnelli *et al.* (2004) ont trouvé une corrélation entre altitude et anthracomasse du sol : le gain de l'un entraînant la perte de l'autre. Ils en ont aussi conclu que la limite actuelle des arbres est de 250 à 100 m inférieure à celle du début de l'Holocène (-10 000 ans BP). D'autres massifs montagneux comme les Apennins (Compostella *et al.* 2013) ou encore les Andes (Di Pasquale *et al.* 2007) ont également fait l'objet de telles approches pédoanthracologiques, montrant des résultats similaires, à savoir une baisse de la limite actuelle des arbres depuis la naissance de l'Holocène. Dans les Hautes Vosges, Goepf (2007) a prouvé que les espaces considérés aujourd'hui comme des chaumes primaires étaient en fait investis par la forêt, au début de l'Holocène, et que l'absence de formations sylvo-cologiques n'est en réalité que le résultat de défrichements successifs depuis l'époque du Néolithique. Dans un autre contexte, celui des refuges glaciaires, Willis *et al.* (2004) comme Robin *et al.* (2016) ont repéré de nouveaux sites en Europe centrale et orientale durant la dernière glaciation, composés de conifères et de feuillus. Ces résultats tendent à remettre en question le fait largement admis que les seuls refuges étaient en Europe méridionale et à repositionner de surcroît l'origine génétique de nos essences forestières actuelles, non plus cantonnée à une seule source géographique.

La question des changements d'aires de distribution des espèces a donc déjà largement fait ses preuves et ce à travers différentes régions du globe.

**(ii) La reconstitution de la végétation durant l'Holocène.**

L'identification des espèces ligneuses au début de l'Holocène est directement ou indirectement traitée par un grand nombre de travaux. Il est très fréquent, de par les datations C<sup>14</sup>, de replacer dans le temps des taxons de plusieurs milliers d'années. D'ailleurs, de nombreuses publications traitant de la variation de la limite des arbres décrivent par ailleurs une végétation très ancienne. Par exemple, Talon (2010) a pu, dans les Alpes du sud, situer à plus de 2800 m d'altitude l'existence passée de forêts aujourd'hui disparues.

En Allemagne, les travaux de Robin *et al.* (2011, 2014) et de Nelle (2010), à partir d'analyses polliniques et d'analyses pédoanthracologiques provenant de sédiments et de charbonnières, ont pu fournir une image plus détaillée des évolutions forestières et paysagères, naturelles et/ou influencées par l'homme, durant l'Holocène. Au Canada, De La Fontaine (2010) s'est intéressé à l'origine des forêts subalpines et a montré l'influence du climat, du biotope et surtout des incendies sur la composition actuelle en essences ligneuses forestières. En France, lors de la construction de la ligne « TGV-Méditerranée », Delhon (2008) a pu élaborer une lecture très précise de l'évolution des espèces ligneuses et des occupations humaines pour la vallée du Rhône du Tardiglaciaire à l'époque moderne. Des alternances ont été mises au jour dans la végétation (chêne, pin), dans les systèmes agricoles (agro-pastoralisme, culture, abandon des terres), ou encore dans le climat (période plus

froide, plus sèche, plus humide). Une dynamique très riche a pu être reconstituée à partir des charbons provenant de séquences naturelles et archéologiques.

L'identification de la végétation durant l'Holocène est donc l'objectif premier et commun à l'ensemble ou presque de la communauté de pédoanthracologue. Notons que, dans le point suivant, le suivi des dynamiques des incendies intègre souvent la question de la végétation durant l'Holocène (e.g. Allevato *et al.* 2012, Asselin *et al.* 2005).

### **(iii) Les dynamiques des incendies.**

Cette question fut surtout étudiée dans des environnements souvent soumis aux incendies. En Colombie Britannique, Gavin *et al.* (2003) ont retracé les différents incendies depuis l'Holocène et ont localisé certains secteurs forestiers qui n'auraient pas brûlé depuis 6 millénaires. Ils ont pu en déduire le rôle déterminant du relief sur la propagation du feu. Fesenmeyer *et al.* (2010), dans les forêts des Appalaches aux U.S.A., ont apporté des preuves concernant une régularité de feux durant les 4000 dernières années, une augmentation de leur fréquence d'apparition il y a 1000 ans, et enfin, leur nette diminution au cours du XVII<sup>ème</sup> siècle. Talon *et al.* (2005), en s'appuyant sur les datations C<sup>14</sup> des charbons au sud du Québec, démontre l'importance des incendies durant l'Holocène précoce et leur absence à partir du milieu de l'Holocène. Dans les mêmes contrées, Payette *et al.* (2012) ont récemment mis au point un « indice de fréquence d'incendie » fondé sur les datations de charbons. Ils ont ainsi mesuré un intervalle entre les incendies pour une région donnée. Cet intervalle diffère avant et après l'Holocène tardif avec une moyenne de 75 ans entre les feux sur les 1000 dernières années contre 165 ans pour la période plus ancienne. Les épisodes de feux ont, de la même manière, été repérés en Suède (Olsson *et al.* 2010), permettant d'identifier les grandes phases d'incendies durant l'Holocène et de les mettre en lien avec les conditions climatiques, confirmant que les conditions plus chaudes et plus sèches favorisent les grands incendies. Constat à mettre en lien avec les scénarii de réchauffement climatique et la probable hausse des incendies et de leur intensité dans notre futur. Un dernier exemple ici, avec le territoire pyrénéen et l'étude de Bal *et al.* (2011) sur les régimes de feux associés aux activités humaines sur les 3300 dernières années : cette étude combine plusieurs approches et permet de voir plusieurs phases d'alternance entre pollens arboricoles, marqueurs d'incendie et pollens céréaliers illustrant notamment l'ancienne pratique de la culture sur brûlis.

Ce troisième axe, développé dans des contextes très différents, permet de montrer l'ampleur de la dynamique des incendies durant l'Holocène (Robin & Nelle 2014, Robin *et al.* 2013). Dynamique provenant d'évènements naturels ou humains car le feu était un outil de défrichage efficace, du moins avant l'utilisation d'outils manuels ou mécaniques. On peut préciser que la pratique de la culture sur brûlis a quasiment disparu des pays dit développés, exception faite du Japon où cette pratique ancestrale est toujours perpétuée dans les territoires montagneux du pays<sup>8</sup>.

### **(iv) L'identification des changements d'usages.**

La pédoanthracologie, rarement employée en écologie historique (Dambrine *et al.* 2007), peut s'avérer être un outil très précis pour retracer l'histoire des usages anciens. Dans cette étude de Dambrine *et al.* (2007) à propos de l'impact des usages agricoles gallo-romains sur l'écosystème forestier (sol, végétation), en forêt de Tronçais, une corrélation a été décelée entre l'abondance de charbon dans les sols et la présence de structures de culture (e.g.

<sup>8</sup> Source : reportage *Japon, la forêt éternelle*, 2012.

habitat, parcellaire). Cette relation tendrait à témoigner que la culture sur brûlis était pratiquée durant l'Antiquité. En Normandie, Dutoit *et al.* (2009) ont resitué la création des prairies et leur origine par brûlage des forêts, forêts composées d'essences climaciques (*Fagus sylvatica*) ces pratiques d'ouverture se justifient par le développement du pastoralisme durant le Néolithique. Dans le Massif Central, les travaux de Bal *et al.* (2014) ont obtenu des résultats similaires avec l'apparition des zones ouvertes (prairies) durant le Néolithique. Cette époque est une phase de développement des activités humaines, visibles notamment par le formatage de son environnement. L'utilisation des données archéologiques conforte ce scénario pour le Mont Lozère. La pédoanthracologie permet aussi de faire le lien entre les usages anciens des sols et l'érosion des sédiments grâce à la relative stratification des âges des charbons en fonction de la profondeur du sol pour des profils pédologiques de type colluvion (Larsen *et al.* 2016).

Quant aux changements d'usages conduisant légitimement à se questionner sur la naturalité d'un écosystème tel que la forêt, Robin *et al.* (2013) ont cherché à répondre à cette question à travers trois sites d'études contrastés (un dans les Alpes françaises, deux dans la plaine allemande). Pour les deux forêts de plaines, la naturalité est assurée par une stabilité de l'état forestier depuis le début de l'Holocène pour l'un et depuis 1000 ans BP pour l'autre. Cette stabilité est décelée grâce aux taxons carbonisés, à savoir *Fagus sylvatica* et *Quercus*, indiquant un stade forestier mature et non pionnier. Pour le cas alpin, la naturalité est entravée par des incendies répétés, perturbant et renouvelant constamment l'écosystème.

Précisons que la thèse de doctorat développée ici s'est élaborée à travers ces quatre axes de recherche, à savoir les changements d'espèces et d'usages des sols depuis la dernière ère glaciaire ainsi que les dynamiques d'incendies.

## 2.4 Les défis de la pédoanthracologie

Les travaux de Delhon (2004) mettent en avant une variabilité spatiale dans l'anthracocénose totale et pose la question de la réelle significativité d'un échantillonnage par rapport à un incendie forestier (Figure 3). La représentativité des prélèvements en contexte pédoanthracologique est remise en cause. En situation archéologique, Théry-Parisot *et al.* (2010) exposent la même problématique avec la succession de cinq filtres dont quatre sont applicables en pédoanthracologie qui réduisent au fur et à mesure la représentativité de l'anthracocénose extraite. Le premier est issu de la composition floristique du peuplement d'origine avant incendie que l'on ne maîtrise pas car elle est non identifiée. L'action du feu engendrant une série de déformations sur l'anatomie du bois biaise la reconnaissance en laboratoire. Intervient ensuite le séjour dans le sédiment, plus ou moins long avant échantillonnage, qui engendre une dégradation des charbons accentuée par la faune et la flore du sol qui brassent les éléments et colonisent les interstices du bois carbonisé. Après tous ces filtres naturels celui de la méthode d'échantillonnage influence la représentativité car seule une petite partie de l'anthracocénose totale du sol est récoltée.

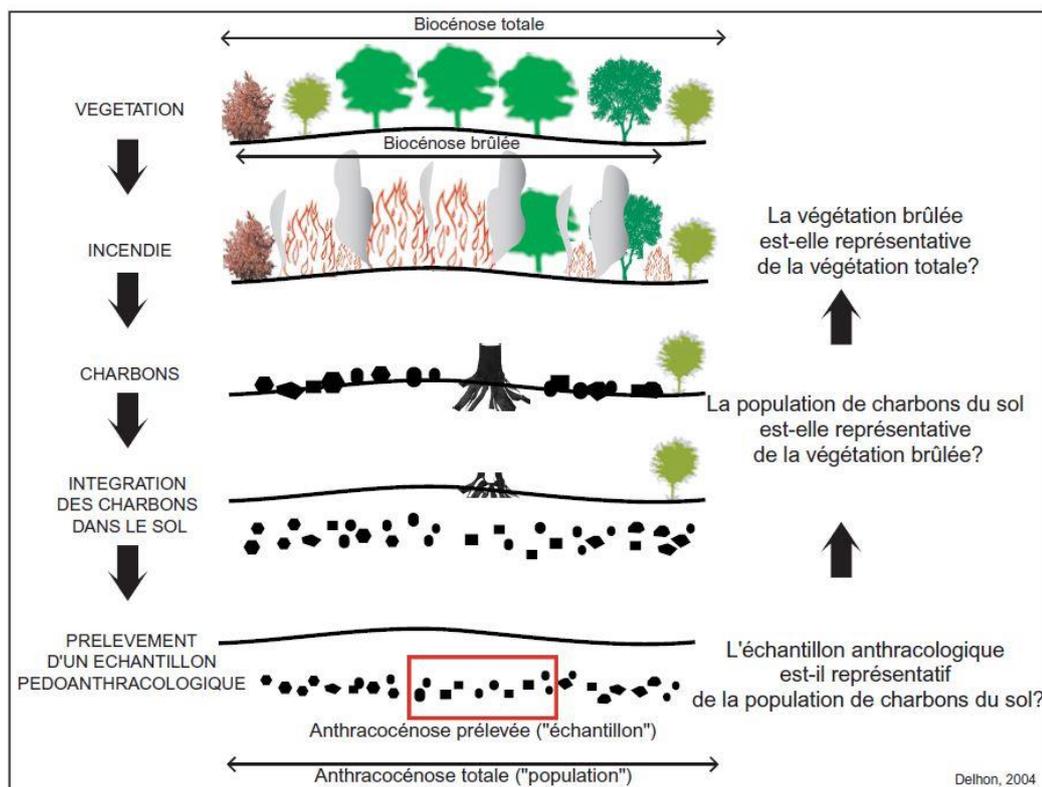


Figure 3 : Transformation d'une biocénose vivante en anthracocénose fossile (dépôt primaire) et le problème de représentativité de l'échantillonnage pédoanthracologique (Delhon 2004).

Plus récemment, les travaux de Touflan *et al.* (2009), de La Fontaine & Asselin (2011), Payette *et al.* (2012), et de Robin *et al.* (2013) ont permis de mettre en avant la variation spatiale des abondances de charbons et des profils anthracologiques, à l'échelle du décamètre. Payette et de La Fontaine, s'appuyant sur l'étude de Talon *et al.* 2005, ont notamment montré cette hétérogénéité dans les anthracomasses et les taxons en réalisant leurs prélèvements tous les 5 ou 10 m, à l'aide d'une tarière à racines (« *root auger* »), selon un quadrillage de 500 ou 1000 m<sup>2</sup>. Il est important de préciser que ces travaux canadiens mettent en lumière une très forte abondance de charbons dès la couche organique (humus) et que le contexte climatique, entraînant la gelée des sols quasiment toute l'année, rend difficile une prospection en profondeur des charbons.

Les observations spatiales ont donné lieu à des modifications protocolaires afin d'inclure cette variabilité. Robin (2013), après avoir constaté des différences dans les séquences anthracologiques (anthracomasse et espèces) entre différentes fosses espacées de seulement 100 à 50 m, propose de prélever et d'identifier dans chacun des horizons, une sélection de 90 fragments répartis dans les 3 classes de taille 1-2, 2-5 et >5 mm. Le gain de temps conséquent en laboratoire permet d'étudier différentes séquences de sol. Touflan (2010), qui a pu mesurer cette même différence de masse et de diversité spécifique entre plusieurs fosses sur seulement 5000 m<sup>2</sup>, choisit d'arrêter la taille minimale des charbons pour l'observation microscopique à 1.25 mm. Encore une manière d'analyser un plus grand nombre de sites. La reconstitution paléo-écologique d'un espace donné peut alors s'établir à partir d'une plus grande série de séquences pédoanthracologiques. L'augmentation des prélèvements semble être une réponse à cette forte variabilité spatiale mais non testée.

Les défis majeurs de la discipline se retrouvent donc dans la maîtrise de la variation spatiale des anthracomasses et des espèces ainsi que dans un effort d'échantillonnage qui soit

adapté au contexte pédo-climatique et au temps nécessaire à l'identification taxonomique en laboratoire.

### 3. L'histoire de la forêt européenne

Chaque climat sur terre est caractérisé par une végétation type à l'état spontané. Pour l'Europe du centre et de l'ouest, le climat de type tempéré implique que la forêt feuillue caduque est la formation végétale adaptée à ce lieu (Watt 1947, Peterken 1996). On parlera alors de climax forestier (Clements 1916). Toutefois on constate actuellement que ce climax n'est pas en place sur la totalité de l'espace européen (Vera 2000). En raison de perturbations naturelles ou anthropiques, d'autres formations végétales sont favorisées : des stades pionniers à bouleaux, des forêts sempervirentes issues de plantations, des prairies entretenues par pâturage ou encore des cultures par exemple.

Les analyses polliniques et la dominance des pollens d'arbres pour la période post glaciaire prouvent que la forêt dominait les paysages (14 000 BP). Vers 12 000 BP, les grands mammifères herbivores (aurochs, bisons) sont déjà présents (e.g. Guintard 1994). Les essences comme les chênes (*Quercus*), les tilleuls (*Tilia*) ou encore le hêtre (*Fagus*) ont colonisé les espaces plus tard, entre 9 000 BP et 1500 BP (e.g. Mitchell 1998, Tinner et al. 1999).

Iversen (1941) montre par la palynologie que les premières ouvertures du paysage au profit du pâturage datent d'il y a 5000 ans. Hormis cette déforestation, les forêts originelles étaient sans doute déjà pâturées et cette action impactant la régénération des arbres conduisit à une ouverture des milieux et à la diminution des surfaces forestières (e.g. Harris & Harris 1991). Ces zones de vides sont devenues des artefacts de forêt par l'action de l'homme mais les essences forestières ont perduré grâce aux reliquats de forêts fermées. Par la suite, lorsque la pression anthropique liée aux mouvements des populations et aux développements des sociétés a diminué, la forêt a retrouvé sa place (Clements 1916). Cette succession de types de végétations a été représentée par Ellenberg (1986, 1988) et reprise par Vera (2000) afin de montrer les différents scénarii pouvant s'enclencher à partir de la forêt originelle (Figure 4).

Ces différentes formations végétales peuvent être présentes dans un même paysage et l'agriculture les a entretenues du Néolithique jusqu'à nos jours. La déforestation au profit de l'agriculture et/ou les pratiques agricoles en milieu forestier (pâtures, cultures) ont donc démarré au Néolithique, ont perduré pendant l'Antiquité et étaient toujours en vigueur au Moyen-Âge avec en particulier les droits d'usages. Cette mixité dans les pratiques et usages des sols a d'ailleurs permis que des espèces forestières, telles que les chênes, soient présentes sans discontinuité depuis 9000 ans (Becker *et al.* 1991). La forêt fermée reconstituée dans les réserves biologiques ne permet pas aux chênes de se régénérer car ils exigent cette ambiance de forêt-pâturée pour se perpétuer.

Ces éléments nous questionnent sur la composition de la forêt primaire et le concept de naturalité car si des espèces héliophiles ou semi-héliophiles ont pu se maintenir, même pendant les périodes avec peu d'influence humaine, alors cela laisse supposer un paysage composé de multiples végétations : prairie, friche, bosquet, arbre isolé, forêt ouverte, forêt fermée (Vera 2000). La représentation communément admise de la forêt ancienne est probablement très différente de la forêt passée où se côtoyaient des écosystèmes différents entretenus par les herbivores. L'usage humain de la forêt depuis plusieurs millénaires a-t-il

joué en défaveur de cette nature primaire ou a-t-il simplement reproduit le schéma naturel de la diversité des habitats dans un même paysage ? Finalement, c'est peut-être la forêt d'aujourd'hui, fermée, souvent monospécifique et homogène à l'échelle d'un massif, qui est la plus éloignée de la dynamique naturelle.

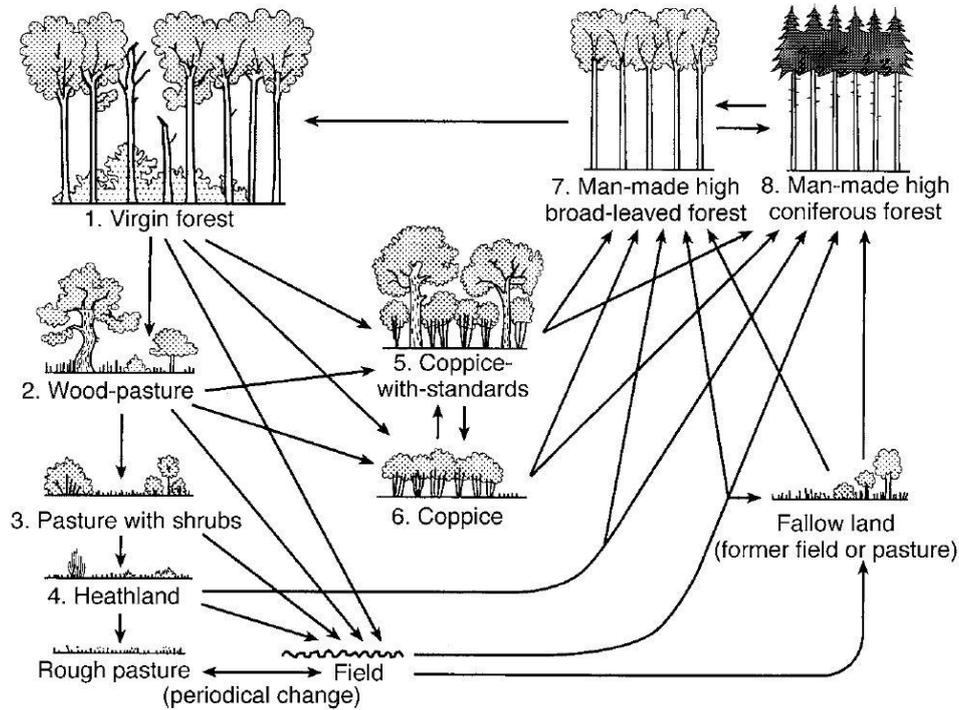


Figure 4 : Possibilités de successions des différentes végétations causées par l'anthropisation et le pâturage à partir de la forêt primaire et (Ellenberg 1986, 1988, Vera 2000).

#### 4. Les objectifs scientifiques

Nous avons vu jusqu'ici ce que sont l'écologie historique, ses applications, ses ressources puis l'approche pédoanthracologique en tant qu'outil pour retracer l'histoire des forêts et enfin l'évolution de la forêt européenne depuis la dernière glaciation avec le rôle important de la diversité des formations végétales, l'influence du pâturage et les usages que l'homme en fait depuis le Néolithique jusqu'à nos jours.

Nous pouvons donc faire mettre en lumière l'objectif principal de la Thèse qui est de **reconstituer les écosystèmes forestiers passés, pour la forêt feuillue caduque, et de retrouver les traces des usages et des perturbations naturelles ou anthropiques subies**. Ces événements sont potentiellement archivés dans les sols forestiers par l'action des incendies passés. Pour les explorer, nous faisons appel à la pédoanthracologie. Mais il va d'abord falloir chercher à résoudre les défis méthodologiques inhérents à cette discipline tels qu'évoqués précédemment.

Nous avons choisi d'analyser les archives anthracologiques pour trois types de sol présents pour les deux forêts prospectées : **podzol, cambisol et luvisol**<sup>9</sup>. Ces formations pédologiques sont représentatives de la forêt tempérée et permettent d'étudier différentes conditions stationnelles influençant les risques d'incendies et les communautés végétales. Notre analyse pourra alors se faire à l'échelle locale selon le type pédologique, à l'échelle du massif forestier par la combinaison des sites et à l'échelle régionale avec les informations apportées par les deux forêts.

**Trois grands axes de recherche** peuvent alors être déterminés. Ils seront les bases de la thèse développée ici.

(i) La volonté de nous assurer de la **représentativité des profils pédoanthracologiques**, en fixant un effort minimal d'échantillonnage, déterminé en quantité extraite et en nombre de charbons identifiés au microscope, nous permet de pouvoir proposer un protocole standardisé et fiable, adapté aux conditions environnementales, afin de hisser la discipline au même rang que la palynologie, à savoir celui d'un outil majeur et indispensable dans la reconstitution des paléoenvironnements et des dynamiques végétales passées.

(ii) Dans le cadre de l'approche spatiale, l'enjeu sera de **capter la variable anthracologique**, horizontalement et verticalement, et de pouvoir prédire ses valeurs. La mesure de l'autocorrélation spatiale de cette variable est donc nécessaire afin d'optimiser l'emplacement des sites d'échantillonnage et la distance à laquelle ils doivent être disposés.

(iii) Il s'agira encore de **confronter l'apport de la pédoanthracologie** avec les autres disciplines de l'écologie historique comme l'archéologie, l'histoire, le LIDAR. Cela se fera à l'échelle régionale en se fondant sur les données déjà collectées sur ces différentes thématiques pour deux grands massifs forestiers représentatifs de la forêt feuillue de plaine européenne.

---

<sup>9</sup> Certains types pédologiques ne sont pas explorés car l'extraction des charbons y est particulièrement difficile : les gleysols en raison de la forte teneur en argile et les rendzines dans les cas de situation édaphique superficielle.

## 5. Références

- Ali, A.A., Carcaillet, C., Talon, B., Roiron, P. & Terral, J.-F. (2005). *Pinus cembra* L. (arolla pine), a common tree in the inner French Alps since the early Holocene and above the present tree line: a synthesis based on charcoal data from soils and travertines: Palaeoecology of *Pinus cembra* in the French Alps. *Journal of Biogeography*, **32**, 1659–1669.
- Allevato, E., Impagliazzo, S., Passariello, I., Marzaioli, F., Terrasi, F. & Di Pasquale, G. (2013). Holocene palaeofires in Neotropics high mountains: The contribution of soil charcoal analysis. *Quaternary International*, **289**, 71–77.
- Asselin, H. & Payette, S. (2005). Detecting local-scale fire episodes on pollen slides. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **137**, 31–40.
- Bal, M.-C., Allée, P. & Liard, M. (2015). The origins of a *Nardus stricta* grassland through soil charcoal analyses: Reconstructing the history of a mountain cultural landscape (Mont Lozère, France) since the Neolithic. *Quaternary International*, **366**, 3–14.
- Bal, M.-C., Pelachs, A., Perez-Obiol, R., Julia, R. & Cunill, R. (2011). Fire history and human activities during the last 3300cal yr BP in Spain's Central Pyrenees: The case of the Estany de Burg. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **300**, 179–190.
- Baudry, J., Burel, F. (1999). *Ecologie du paysage. Concepts, methods et applications*. TEC & DOC, Paris.
- Becker, B., Kromer, B. & Trimborn, P. (1991). A stable-isotope tree-ring timescale of the Late Glacial/Holocene boundary. *Nature*, **353**, 647–649.
- Bellemare, J., Motzkin, G. & Foster, D.R. (2002). Legacies of the agricultural past in the forested present: an assessment of historical land-use effects on rich mesic forests. *Journal of Biogeography*, **29**, 1401–1420.
- Birks, H.J.B. & Birks, H.H. (1980). *Quaternary Palaeoecology*. Edward Arnold, London.
- Bossyut, B., Hermy, M. & Deckers, J. (1999). Migration of herbaceous plant species across ancient – recent forest ecotones in central Belgium. *Journal of Ecology*, **87**, 629–638.
- Bouvarel, P. (1984). Le dépérissement des forêts attribués aux dépôts atmosphériques acides. *Revue Forestière Française*, **36**, 173–180.
- Brun, C. (2011). Anthropogenic indicators in pollen diagrams in eastern France: a critical review. *Vegetation history and Archaeobotany*, **20**, 135–142.
- Bürgi, M. & Gimmi, U. (2007). Three objectives of historical ecology: the case of litter collecting in Central European forests. *Landscape Ecology*, **22**, 77–87.
- Bürgi, M. & Russel, E.W.B. (2001). Integrative methods to study landscape changes. *Land Use Policy*, **18**, 9–16.
- Carcaillet, C., Perroux, A.S., Genrier, A. & Perrette, Y. (2007). Sedimentary charcoal pattern in a karstic underground lake, Vercors massif, French Alps: implication of palaeo-fire history. *The Holocene*, **17**, 845–850.
- Carcaillet, C. (2001). Soil particles reworking evidences by AMS 14 C dating of charcoal. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, **332**, 21–28.
- Carcaillet, C. & Thion, M. (1996) Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **91**, 399–416.
- Carnelli, A.L., Theurillat, J.-P., Thion, M., Vadi, G. & Talon, B. (2004). Past uppermost tree

- limit in the Central European Alps (Switzerland) based on soil and soil charcoal. *The Holocene*, **14**, 393–405.
- Chabal, L. (1988). Pourquoi et comment prélever des charbons de bois pour la période antique : les méthodes utilisées sur le site de Lattes (Hérault). ATTARA, A.R.A.L.O., Ed Caveirac, 187–222.
- Cinotti, B. (1996). Evolution des surfaces boisées en France : proposition de reconstitution depuis le début du XIXe siècle. *Revue Forestière Française*, **48**, 547–562.
- Clark, J.S. (1988). Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary Research*, **30**, 67–80.
- Clements, F.E. (1916). Plant Succession. An analysis of the Development of Vegetation. Carnegie Institution, **242**. Washington, DC.
- Compostella, C., Trombino, L. & Caccianiga, M. (2013). Late Holocene soil evolution and treeline fluctuations in the Northern Apennines. *Quaternary International*, **289**, 46–59.
- Cousins, S.A.O. (2001). Analysis of land-cover transitions based on 17th and 18th century cadastral maps and aerial photographs. *Landscape Ecology*, **16**, 41–54.
- Crews, J. (2003). Le symbolisme de la forêt et des arbres dans le folklore. *En ligne, disponible sur: <http://www.fao.org>*.
- Cunill, R., Soriano, J.-M., Bal, M.-C., Pèlachs, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, **21**, 373–384.
- Dambrine, E., Dupouey, J.-L., Laüt, L., Humbert, L., Thion, M., Beauvils, T. & Richard, H. (2007). Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture. *Ecology*, **88**, 1430–1439.
- Decocq, G., Aubert, M., Dupont, F., Alard, D., Saguez, R., WATTEZ-FRANGER, A., Foucault, B.D., DELELIS-DUSOLLIER, A. & Bardat, J. (2004). Plant diversity in a managed temperate deciduous forest: understory response to two silvicultural systems. *Journal of Applied Ecology*, **41**, 1065–1079.
- Decocq, G. (2004). Utilisation de la flore et de la végétation actuelles en prospection archéologique. *Méthodes et initiations d'histoire et d'archéologie*, 55–71. Editions du Temps, Nantes.
- Debazac, E.F. (1985). Les trois âges de la foresterie. *Aménagement et Nature*, **80**, 6–8.
- De Keersmaeker, L., Vandekerckhove, K., Verstraeten, A., Baeten, L., Verschelde, P., Thomaes, A., Hermy, M. & Verheyen, K. (2011). Clear-felling effects on colonization rates of shade-tolerant forest herbs into a post-agricultural forest adjacent to ancient forest: Clear-fell effects on colonization by forest herbs. *Applied Vegetation Science*, **14**, 75–83.
- Deléage, J.P. & Hémerly, D. (1989). De l'éco-histoire à l'écologie monde. *L'Homme et la Société*, 91–92. L'Harmattan, Paris.
- Delhon, C. & Thiébault, S. (2005) The migration of beech (*Fagus sylvatica* L.) up the Rhone: the Mediterranean history of a 'mountain' species. *Vegetation History and Archaeobotany*, **14**, 119–132.
- Delhon, C. (2004) *Anthropisation et paléoclimats du Tardiglaciaire à l'Holocène en moyenne vallée du Rhône : études pluridisciplinaires des spectres phytolithiques et pédo-anthracologiques de séquences naturelles et de site archéologiques*. Thèse de Doctorat. Université de Paris I.
- Dehlon, C., Alexandre, A., Berger, J.F., Thiébault, S., Brochier, J.L. & Meunier, J.D. (2003).

- Phytolith assemblages as a promising tool for reconstructing Mediterranean Holocene vegetation. *Quaternary Research*, **59**, 48–60.
- Di Pasquale, G., Marziano, M., Impagliazzo, S., Lubritto, C., De Natale, A. & Bader, M.Y. (2008). The Holocene treeline in the northern Andes (Ecuador): First evidence from soil charcoal. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **259**, 17–34.
- Dupouey, J.-L., Bachacou, J., Cosserat, R., Aberdam, S., Vallauri, D., Chappart, G. & Corvisier de Villèle, M.-A. (2007). Vers la réalisation d'une carte géoréférencée des forêts anciennes de France. *Le Monde des cartes*, **191**, 85–98.
- Dupouey, J.-L., Dambrine, E., Laffite, J.-D. & Moares, C. (2002). Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, **83**, 2978–2984.
- Dutoit, T., Thinon, M., Talon, B., Buisson, E. & Alard, D. (2009). Sampling soil wood charcoals at a high spatial resolution: a new methodology to investigate the origin of grassland plant communities. *Journal of Vegetation Science*, **20**, 349–358.
- Dutoit, T., Buisson, E., Roche, P. & Alard, D. (2004). Land use history and botanical changes in the calcareous hillsides of Upper-Normandy (north-western France): new implications for their conservation management. *Biological Conservation*, **115**, 1–19.
- Dzwonko, Z. & Loster, S. (1989). Distribution of vascular plant species in small woodlands on the Western Carpathian foothills. *OIKOS*, **56**, 77–86.
- Egan, D. & Howell, E.A. (2005). *The Historical Ecology Handbook*. Island Press.
- Ellenberg, H. (1988). *Vegetation Ecology of Central Europe*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ellenberg, H. (1986). *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen ökologischer Sicht*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Ertlen, D., Schwartz, D., Trautmann, M., Webster, R. & Brunet, D. (2010). Discriminating between organic matter in soil from grass and forest by near-infrared spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, **63**, 207–216.
- Etienne, D., Ruffaldi, P., Dupouey, J.L., Georges-Leroy, M., Ritz, F. & Dambrine, E. (2013). Searching for ancient forest: a 2000 years history of land use in northeastern French forest deduced from the pollen compositions of closed depressions. *The Holocene*, **23**, 678–691.
- Farina, A. (2005). *Principles and methods in Landscape Ecology – Towards a Science of Landscape*. Springer Verlag, New York.
- Feiss, T., Dupouey, J.L., Rochel, X., Bergès, L. & Chauchard, S. (2010). Long-term after effect of overexploitation in forests. A comparison between two ancient silvicultural treatments: coppice versus quarter in reserve. International Conference: Frontier in historical ecology, Birmensdorf, Suisse.
- Fesenmyer, K.A. & Christensen Jr, N.L. (2010). Reconstructing Holocene fire history in a southern Appalachian forest using soil charcoal. *Ecology*, **91**, 662–670.
- Fiorentino, G. & Magri, D. (Eds.). (2008). *Charcoals from the past: cultural and palaeoenvironmental implications: proceedings of the third international meeting of anthracology, Cavallino, Lecce (Italy), June 28th - July 1st 2004*. Archaeopress, Oxford.
- Fliche, P. (1886). Note sur une substitution ancienne d'essences forestières aux environs de Nancy. *Bulletin de la Société des Sciences de Nancy*, 31–40.
- Foster, D., Swanson, F., Aber, J., Burke, I., Brokaw, N., Tilman, D. & Knapp, A. (2003). The importance of land-use legacies to ecology and conservation. *BioScience*, **53**, 77–88.
- Foster, D. (2000). Conservation lessons and challenges from ecological history. *Forest History Today*, 2–11.

- Foster, D.R. (1988). Disturbance history, community organization and vegetation dynamics of the old-growth Pisgah forest, South-Western New Hampshire, USA. *Journal of Ecology*, **76**, 105–134.
- Fraterrigo, J.M., Turner, M.G., Pearson, S.M. & Dixon, P. (2005). Effects of past land use on spatial heterogeneity of soil nutrients in southern Appalachian forests. *Ecological Monographs*, **75**, 215–230.
- Fritts, H.C. & Swetnam, T.W. (1989). Dendroecology: A tool for evaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research*, **19**, 111–189.
- Gavin, D.G., Brubaker, L.B. & Lertzman, K.P. (2003). Holocene fire history of a coastal temperate rain forest based on soil charcoal radiocarbon dates. *Ecology*, **84**, 186–201.
- Georges-Leroy, M., Bock, J., Dambrine, É. & Dupouey, J.-L. (2011). Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie*, 117–129.
- Gimmi, U. & Bugmann, H. (2013). Integrating historical ecology and ecological modeling. *Landscape Ecology*, **28**, 785–787.
- Girel, J. (2006). Quand le passé éclaire le présent : écologie et histoire du paysage. *Géocarrefour*, **81**, 249–264.
- Glatzel G., (1999). Historic forest use and its possible implications to recently accelerated tree growth in central Europe. *EFI Proceedings*, **27**, 65–74.
- Godwin, H. (1934). Pollen analysis. An outline of the problems and potentialities of the method. Part II. General applications of pollen analysis. *New Phytologist*, **33**, 325–358.
- Goepp, S. (2007). *Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'homme*. Thèse de Doctorat. Université Louis Pasteur-Strasbourg I.
- Grainger, J. (1940) Historical ecology of the fungi. *The Naturalist*, 285–287.
- Grosjean G (1980). La géographie en Suisse. 24<sup>ème</sup> congrès international de géographie. *Geographica Helvetica*, **35**.
- Guintard, G. & Tardy, F. (1994). Les Bovins de l'île Amsterdam. Un exemple d'isolement génétique. *Aurochs. Le retour. Aurochs, vaches et autres bovins de la préhistoire à nos jours*, 203–209. Centre Jurassien du Patrimoine, Lons-Le-Saunier.
- Haidvogel, G., Lajus, D., Pont, D., Schmid, M., Jungwirth, M. & Lajus, J. (2013). Typology of historical sources and the reconstruction of long-term historical changes of riverine fish: a case study of the Austrian Danube and Northern Russian rivers. *Ecology of Freshwater Fish*, **23**, 498–515.
- Harris, E. & Harris, J. (1991). *Wildlife Conservation in Managed Woodlands and Forests*. Basil Blackwell, Oxford.
- Harris, J.A., Hobbs, R.J., Higgs, E. & Aronson, J. (2006). Ecological restoration and global climate change. *Restoration Ecology*, **14**, 170–176.
- Hermey, M., Honnay, O., Firbank, L., Grashof-Bokdam, C. & Lawesson, J.E. (1999). An ecological comparison between ancient and other forest plant species of Europe, and the implications for forest conservation. *Biological conservation*, **91**, 9–22.
- Hermey M (1994) Effects of former land use on plant species diversity and pattern in European deciduous woodlands. NATO ASI Series 20:123–144, Biodiversity, Temperate Ecosystems, and Global Change, TJB Boyle and CEB Boyle, Berlin Heidelberg.

- Iversen, J. (1941). Land occupation in Denmark's Stone Age. A pollen-analytical study of the influence of farmer culture on the vegetational development. *Geological Survey of Denmark*, **66**.
- Jussy, J.H., Koerner, W., Dambrine, E., Dupouey, J.L. & Benoit, M. (2002). Influence of former agricultural land use on net nitrate production in forest soils. *European Journal of Soil Science*, **53**, 367–374.
- Kirby, K.J. & Watkins, C. (1998). The ecological history of European forests. Wallingford, UK, CAB International.
- Koerner, W., Cinotti, B., Jussy, J.H. & Benoit, M. (2000). Evolution des surfaces boisées en France depuis le début du XIXe siècle : identification et localisation des boisements des territoires agricoles abandonnés. *Revue Forestière Française*, **52**, 249–269.
- Kotze, D.J., Brandmayr, P., Casale, A., Dauffy-Richard, E., Dekoninck, W., Koivula, M., Lovei, G., Mossakowski, D., Noordijk, J., Paarmann, W., Pizzoloto, R., Saska, P., Schwerk, A., Serrano, J., Szyszko, J., Taboada Palomares, A., Turin, H., Venn, S., Vermeulen, R. & Zetto Brandmayr, T. (2011). Forty years of carabid beetle research in Europe – from taxonomy, biology, ecology and population studies to bioindication, habitat assessment and conservation. *ZooKeys*, **100**, 55–148.
- de Lafontaine, G. & Asselin, H. (2011). Soil charcoal stability over the Holocene across boreal northeastern North America. *Quaternary Research*, **76**, 196–200.
- de Lafontaine, G., Turgeon, J. & Payette, S. (2010). Phylogeography of white spruce (*Picea glauca*) in eastern North America reveals contrasting ecological trajectories. *Journal of Biogeography*, **37**, 741–751.
- Langhor, R. (2000) Tree sway turbation of soils as observed on archaeological sites in the sandy area of northern Flanders, Belgium. *Pedologie-Themata*, **8**, 123–129.
- Larsen, A., Robin, V., Fu Ling, A., Larsen, J. & Bork, H.-R. (2016). The influence of historic land-use changes on hillslope erosion and sediment redistribution. *The Holocene* in press
- Lowe, J.J. (1982). Three flandrian pollen profiles from the teith valley, Perthshire, Scotland. *New Phytologist*, **90**, 371–385.
- Lynch, J.A., Clark, J.S. & Stocks, B.J. (2004). Charcoal production, dispersal and deposition from the Fort Providence experimental fire: interpreting fire regimes from charcoal records in boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research*, **34**, 1642–1656.
- Malin, J.C. (1984). History and Ecology: Studies of the Grassland. University of Nebraska Press, Lincoln.
- Manten, A.A. (1967). Lennart von Post and the foundation of modern Palynology. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **1**, 11–22.
- McDonnell, M.J. & Pickett, S.T.A. (1993). Humans as Components of Ecosystems: The Ecology of Subtle Human Effects and Populated Areas. Springer, New York.
- Mitchell, F.J.G. (1998). The investigation of long-term succession in temperate woodland using fine spatial resolution pollen analysis. *The Ecological History of European Forests*, 213 – 223. CAB International, Wallingford.
- Motzkin, G., Wilson, P., Foster, D.R. & Allen, A. (1999). Vegetation patterns in heterogeneous landscapes: the importance of history and environment. *Journal of Vegetation Science*, **10**, 903–920.
- Nadon, M.O., Baum, J.K., Williams, I.D., McPherson, J.M., Zgliczynski, B.J., Richards, B.L., Schroeder, R.E. & Brainard, R.E. (2012). Re-creating missing population baselines for pacific reef sharks. *Conservation Biology*, **26**, 493–503.
- Nelle, O., Dreibrodt, S. & Dannath, Y. (2010). Combining pollen and charcoal: evaluating

- Holocene vegetation composition and dynamics. *Journal of Archaeological Science*, **37**, 2126–2135.
- Olsson, F., Gaillard, M.-J., Lemdahl, G., Greisman, A., Lanos, P., Marguerie, D., Marcoux, N., Skoglund, P. & Wäglind, J. (2010). A continuous record of fire covering the last 10,500 calendar years from southern Sweden — The role of climate and human activities. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**, 128–141.
- Orengo, H.A., Ejarque, A. & Albiach, R. (2014). Water management and land-use practices from the Iron-Age to the Roman period in Eastern Iberia. *Journal of Archaeological Science*, **49**, 265–275.
- Payette, S., Delwaide, A., Schaffhauser, A. & Magnan, G. (2012). Calculating long-term fire frequency at the stand scale from charcoal data. *Ecosphere*, **3**, art59.
- Peterken, G.F. (1996). *Natural Woodland. Ecology and Conservation in Northern Temperate Regions*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Peterken, G.F. (1981). *Woodland conservation and management*. Chapman and Hall, London.
- Peters, M.E. & Higuera, P.E. (2007). Quantifying the source area of macroscopic charcoal with a particle dispersal model. *Quaternary Research*, **67**, 304–310.
- Rackham, O. (1980). *Ancient woodland, its History, Vegetation and Uses in England*. Arnold, London.
- Rackham, O. (1967). The history and effects of coppicing as a woodland practice. *The Biotic Effects of Public Pressures on the Environment. Monks Wood Experimental Station Symposium*, **3**, 82–98. The Nature Conservancy, London.
- Robin, V., Nadeau, M.-J., Grootes, P.M., Bork, H.-R. & Nelle, O. (2016). Too early and too northerly: evidence of temperate trees in northern Central Europe during the Younger Dryas. *New Phytologist* in press.
- Robin, V. & Nelle, O. (2014). Contribution to the reconstruction of central European fire history, based on the soil charcoal analysis of study sites in northern and central Germany. *Vegetation History and Archaeobotany*, **23**, 51–65.
- Robin, V., Bork, H.-R., Nadeau, M.-J. & Nelle, O. (2014). Fire and forest history of central European low mountain forest sites based on soil charcoal analysis: The case of the eastern Harz. *The Holocene*, **24**, 35–47.
- Robin, V., Knapp, H., Rickert, B.-H., Talon, B. & Nelle, O. (2013). Comparaison de signaux anthracologiques Holocènes issus de différents types d’archives en Allemagne vers une reconstitution plus précise de l’histoire des incendies ? *Quaternaire*, **24**, 167–177.
- Robin, V., Talon, B. & Nelle, O. (2013). Pedoanthracological contribution to forest naturalness assessment. *Quaternary International*, **289**, 5–15.
- Robin, V., Rickert, B.-H., Nadeau, M.-J. & Nelle, O. (2011). Assessing Holocene vegetation and fire history by a multiproxy approach: The cas of Stodthagen Forest (northern Germany). *The Holocene*, **22**, 337–346.
- Rousseau, P. (1990). L’évolution des forêts françaises métropolitaines d’après les statistiques forestières. *Revue Forestière Française*, **42**, 56–68.
- Russel, E.W.B. (1997). *People and the Land through time: Linking Ecology and History*. Yale University Press, New Haven, London.
- Rymer, L. (1974). *The Palaeoecology and Historical Ecology of the Parish of North Knapdale, Orkney*. Université de Cambridge, Cambridge.
- Sanderson, E.W., Jaiteh, M., Levy, M.A., Redford, K.H., Wannebo, A.V. & Woolmer, G. (2002).

- The Human Footprint and the Last of the Wild The human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not. *BioScience*, **52**, 891–904.
- Schlumbaum, A., Tensen, M. & Jaenicke-Després, V. (2008). Ancient plant DNA in archaeobotany. *Vegetation History and Archaeobotany*, **17**, 233–244.
- Schweingruber, F.H. (1990a) Anatomy of European Woods. Bern, Stuttgart.
- Schweingruber, F.H. (1990b) Microscopic Wood Anatomy. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf.
- Sheail, J. (1980). Historical Ecology, the Documentary Evidence. *Institute of Terrestrial Ecology*. Cambridge.
- Sittler, B. & Hauger, K. (2007). Les apports du laser aéroporté à la documentation de parcellaires anciens fossilisés par la forêt : l'exemple des champs bombés de Rastatt en Pays de Bade. *La mémoire des forêts, acte du colloque « Forêt, archéologie et environnement »*, 155–161.
- Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P., Jäger, J., Matson, P., Moore, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H.J., Turner, B.L. & Wasson, R.J. (Eds.). (2005). The Anthropocene Era: How Humans are Changing the Earth System. *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*, pp. 81–141. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Swetnam, T.W., Allen, C.D. & Betancourt, J.L. (1999). Applied historical ecology: using the past to manage for the future. *Ecological applications*, **9**, 1189–1206.
- Szabo, P. (2015). Historical ecology: past, present and future. *Biological reviews*, **90**, 997–1014.
- Szabo, P. & Hédli, R. (2011). Advancing the integration of history and ecology for conservation. *Conservation Biology*, **25**, 680–687.
- Talon, B. (2010). Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: evidence from soil charcoal. *The Holocene*, **20**, 35–44.
- Talon, B., Payette, S., Filion, L. & Delwaide, A. (2005). Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in Southern Québec, Canada, from charred wood in mineral soils. *Quaternary Research*, **64**, 36–43.
- Théry-Parisot, I., Chabal, L. & Chrzavzez, J. (2010). Anthracology and taphonomy, from wood gathering to charcoal analysis. A review of the taphonomic processes modifying charcoal assemblages, in archaeological contexts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**, 142–153.
- Thimonier, A., Pannatier, E.G., Schmitt, M., Waldner, P., Schleppi, P. & Braun, S. (2012). Dépôts atmosphériques azotés et leurs effets en forêt : un bilan des sites d'observation à long terme. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, **163**, 343–354.
- Thinon, M. (1992) L'analyse pédoanthracologique. Aspects méthodologiques et applications. Thèse de Doctorat. Université d'Aix-Marseille, Marseille.
- Thinon, M. (1978) Pédanthracologie : une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le Néolithique. *Comptes rendues hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, **287**, 1203–1206.
- Tinner, W., Hubschmid, P., Wehrli, M., Ammann, B. & Conedera, M. (1999). Long-term fire ecology and dynamics in southern Switzerland. *Journal of Ecology*, **87**, 273–189.
- Touflan, P., Talon, B. & Walsh, K. (2010). Soil charcoal analysis: a reliable tool for spatially precise studies of past forest dynamics: a case study in the French southern Alps. *The Holocene*, **20**, 45–52.

- Touflan, P. & Talon, B. (2009). Spatial Reliability of Soil Charcoal Analysis: The Case of Subalpine Forest Soils. *Ecoscience*, **16**, 23–27.
- Trustrum, N.A. & De Rose, R.C. (1988). Soil depth-age relationship of landslides on deforested hillslopes, taranaki, New Zealand. *Geomorphology*, **1**, 143–160.
- Vallauri, D., Grel, A., Granier, E. & Dupouey, J.-L. (2012). Les forêts de Cassini. *Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles. Rapport WWF/INRA, Marseille*, **64**.
- Vauchelet, C. (2014). Long term impact of forest management on forest ecosystem: The case of “Quart de Réserve” in Northeastern France. Dissertation de Master, 37 p. Université de Lorraine, Nancy.
- Vautier, F., Toumazet, J.-P., Roussel, E., Faure, M., Abadi, M., Flórez, M. & Dousteysier B. (2014). Utilisation d’images dérivées d’un jeu de données LiDAR pour la détection automatisée de vestiges archéologiques (programme de recherche méthodologique LiDARCHEO). Journée Technique du CRAIG « Cartographie et Archéologie ». MSH Clermont-Ferrand.
- Veblen, T. & Lorenz, D.C. (1986). Anthropogenic disturbance and recovery patterns in montane forests, Colorado front range. *Physical Geography*, **7**, 1–24.
- Vera, F.W.M. (2000). Grazing ecology and forest history. CABI Publishing, Wallingford.
- Verheyen, K., Honnay, O., Motzkin, B., Hermy, M. & Foster, D.R. (2003). Response of forest plant species to land-use change: a life-history trait-based approach. *Journal of Ecology*, **91**, 563–577.
- Verheyen, K., Bossuyt, B., Hermy, M. & Tack, G. (1999). The land use history (1278–1990) of a mixed hardwood forest in western Belgium and its relationship with chemical soil characteristics. *Journal of Biogeography*, **26**, 1115–1128.
- Vitousek, P.M., Mooney, H.A., Lubchenco, J. & Melillo, J.M. (1997). Human domination of Earth’s ecosystems. *Science*, **277**, 494–499.
- Watt, A.S. (1947). Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology*, **35**, 1–22.
- Willis, K.J. & van Andel, T.H. (2004) Trees or not trees? The environments of central and eastern Europe during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews*, **23**, 2369–2387.
- Wulf, M. (1997). Plant species as indicators of ancient woodland in northwestern Germany. *Journal of Vegetation Science*, **8**, 635 – 642.

## Chapitre II : La zone d'étude

---

Ce deuxième chapitre vise à décrire la zone d'étude, les forêts concernées et les profils pédologiques rencontrés dans notre approche pédoanthracologique. Il présentera les éléments du contexte global, actuel et historique, dont certains points seront repris dans les articles scientifiques des chapitres III et IV.

### 1 Le territoire picard

Le thème de recherche de cette thèse porte sur les forêts anciennes du nord de la France. Ces forêts sont situées en région Nord-Pas-De-Calais-Picardie. Deux massifs sont étudiés : les forêts domaniales de Compiègne (49°24'54"N, 2°49'23"E), dans l'Oise (60), et de Saint Gobain (49°35'48"N, 3°22'33"E), dans l'Aisne (02). Nous détaillerons dans les points 2 et 3 de ce chapitre les spécificités de ces deux territoires qui ont justifié leur place dans cette approche pédoanthracologique et d'écologie historique.

Comme les villes de Compiègne et de Saint Gobain sont distantes de seulement 45 km (Figure 5), nous traiterons conjointement le contexte climatique, humain et forestier, avant de considérer séparément la géologie, la pédologie, l'histoire et les sites de prélèvements pour chacun des territoires.

#### 1.1 Le contexte humain et forestier

Le territoire picard s'étend sur près de 20 000 km<sup>2</sup>, soit 3.5% de la France. Ce terroir se caractérise par une très forte présence de terres cultivées (60% de sa surface) la Picardie demeurant une des terres les plus fertiles de France (blé, betterave, pomme de terre, protéagineux). Les villes et habitats urbains n'y représentent que 1.5% de l'occupation des sols.

En ce qui concerne la forêt, elle couvre 17% de la Picardie (Figure 5), valeur inférieure à la moyenne nationale (30%) et se répartit de manière hétérogène entre les trois départements<sup>10</sup>, l'Oise et le sud de l'Aisne étant largement plus boisés que le reste du territoire (plus de 50% du taux de boisement de la région). La propriété forestière est divisée à 27% pour le publique (80% domaniale, 20% communale) et 73% pour le privé. Les forêts publiques couvrent cependant 80% de la surface forestière picarde contre seulement 20% pour les privées.

---

<sup>10</sup> Source IFN, ONF (Directive Régionale d'Aménagement (2006), Schéma Régional d'Aménagement (2007)).

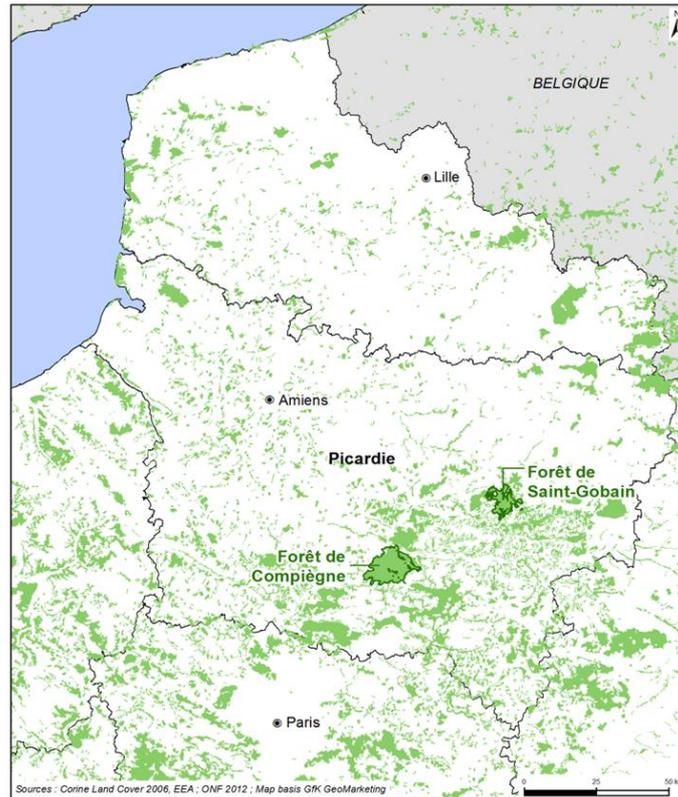


Figure 5 : Carte de localisation de la zone d'étude et des forêts domaniales de Compiègne et Saint Gobain. En vert les zones boisées.

La forêt domaniale picarde se compose essentiellement de peuplements feuillus (90%) avec (i) la chênaie sessiliflore atlantique ou continentale (36%) et (ii) la hêtraie atlantique (44%). Concernant les formations résineuses (10%), on trouve principalement la pineraie atlantique.

La forêt domaniale est à vocation de production et ce sont les traitements en futaie régulière (79%) qui dominent, suivis des mélanges futaie-taillis (19%), en voie de régularisation vers la futaie régulière, résultat de la politique forestière nationale, et du taillis (2%).

Le risque d'incendie pour ces forêts de Picardie est assez faible pour qu'aucun dispositif de lutte ne soit d'ailleurs en place dans la région d'autant que le brûlage des rémanents liés à l'exploitation forestière est formellement interdit, et que seules les stations forestières sur sable sont exposées à ces risques à cause de la présence de tapis denses et secs de fougères aigle (*Pteridium aquilinum*).

On précisera également que la grande faune est bien présente dans les forêts domaniales picardes et provoque beaucoup de perturbations (i) sur la régénération des peuplements, entraînant une sélection naturelle des essences forestières (Teillaud et al. 1991). Citons le cerf (*Cervus elaphus*) en surpopulation à St Gobain et Compiègne avec 4 individus pour 100 ha. Et (ii) sur les sols avec la surpopulation de sangliers (*Sus crofa*) qui brassent les horizons superficiels des sols (Gerard et al. 1991).

## 1.2 Le climat

Le climat de la Picardie est de type océanique frais avec un gradient de continentalité qui s'accroît en se rapprochant de la Champagne-Ardenne. Le relief n'est pas marqué car

la région repose principalement sur des plateaux. La pluviométrie est homogène sur le territoire avec une moyenne mensuelle de 50 à 60 mm d'eau. La zone de St Gobain cependant est plus encline à recevoir plus de précipitations de par l'influence continentale et la proximité des Ardennes. L'humidité relative est de 80% en moyenne sur l'année. La température annuelle varie de 9 à 10°C et le nombre de jours de brouillard est d'environ 55 à l'année, contre 65 jours de gelée. Deux courants majeurs de vent sont observés sur le territoire : le premier, le plus fort, vient d'ouest, donc de l'Atlantique et le second du nord-est c'est-à-dire des territoires scandinaves.

Ces conditions climatiques influencent favorablement le développement forestier grâce à une saison de végétation longue et un bon apport en eau.

### 1.3 Géologie

La géologie de la Picardie, reposant sur le bassin sédimentaire de Paris, est constituée de 2 complexes majeurs :

- Les craies du Crétacé Supérieur s'étendent globalement sur l'ensemble du territoire avec une couverture limoneuse datant du Quaternaire.
- Plus localement, les sables et argiles de l'Eocène ainsi que les sables de Fontainebleau de l'Eocène sont concentrés au sud de l'Aisne et à l'est de l'Oise. Sables et argiles sont souvent posés sur le substrat crayeux.

### 1.4 Pédologie

Abordons dans ce point la diversité pédologique que l'on peut rencontrer en parcourant les forêts de Picardie et notamment celles de Compiègne et de St Gobain. Il existe cinq groupements pédologiques<sup>11</sup> :

- Les profils calcimagnésiques : caractérisés par des affleurements calcaires et une dominance du calcium et du magnésium. On les trouve sous deux formes :
  - Le type humifère : le profil est de type Ah-C, très riche en éléments grossiers et en calcaire actif. Il se retrouve ici sous la forme *rendzine forestière colluviale* principalement.
  - Le type brunifié : caractérisé par une décarbonatation partielle sur le sommet du profil, une libération d'oxydes ferriques, un profil de type Ah-(B)-C et une abondance de calcaire actif dans le bas du profil, il se retrouve dans la région sous les formes *sol brun calcique* ou *rendzine brunifiée*.
- Les *cambisols* : ce profil de type Ah-B-C, est constitué en Picardie systématiquement de sable et/ou de limon. Les horizons y sont décarbonatés, le B riche en oxyde de fer.
- Les facies lessivés : nommés les *luvisols*, leur profil est de type Ah-Ae-Bt-C, avec un horizon caractéristique de lessivage Ae, un horizon d'accumulation des argiles Bt et une texture à dominante limoneuse.
- Les *podzols* : ce sont des sols pauvres, aux horizons très différenciés et à la texture sableuse ; on les retrouve sous la forme *podzol forestier meuble*. Leur profil est de type Ah-Ae-Bs-C ou le Bs est de couleur rouille, riche en sesquioxydes.
- Les sols hydromorphes : les *gleysols* sont caractérisés par des phénomènes d'oxydoréductions du fer, de saturation en eau (permanente ou temporaire) et de

---

<sup>11</sup> Sources ONF (D.R.A.) ; Duchaufour *Introduction à la science des sols*, 6<sup>ème</sup> édition.

déficit en oxygène. Le profil peut varier mais reste globalement formé par les horizons Ah-Ag-Bg.

Abordons maintenant les spécificités forestières, géologiques et historiques des deux forêts concernées ainsi que leurs sites d'études respectifs.

## 2. La forêt de Saint Gobain

Le massif forestier de Saint Gobain, situé près de la ville de Laon, s'étend sur 9000 ha et constitue avec Compiègne un continuum forestier partant du sud de l'Oise et se terminant dans l'Aisne. Cette forêt se trouve au carrefour de deux grandes zones biogéographiques, atlantique et continentale, conférant à St Gobain une grande potentialité en termes de diversité d'espèces et de milieux.

### 2.1 Géologie

La forêt de St Gobain est principalement posée sur une butte témoin<sup>12</sup> (Figure 6), l'altitude variant donc de 55 m pour les parties basses à 216 m pour le point culminant. Cette morphologie s'explique par la présence d'une couche de calcaire du Lutécien (couche n°4), socle de la forêt, qui protège une fine couche d'argile de Laon (couche n°5), rarement affleurant, et d'une épaisse formation de sable de Cuise (couche n°6). L'érosion de ces couches entraîne la formation de vallons encaissés, l'isolement de buttes et un important colluvionnement.

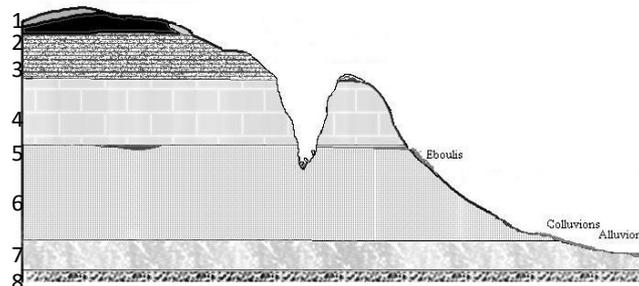


Figure 6 : Coupe géologique simplifiée pour la forêt de Saint Gobain.

Le sommet de la butte témoin est constitué d'une couche de sable Bartonien (couche n°2), autrement dit du sable podzolisé, et de limon lœssique (couche n°1) de formation superficielle. Les argiles de St Gobain (couche n°3) font le lien entre la couche du Lutécien et du Bartonien. Les couches n°7 et 8, respectivement les argiles à lignites et les faluns à huîtres, ne concernent pas le massif de St Gobain.

Cette diversité géologique et topographique permet la confrontation avec une grande diversité pédologique sur une relative courte distance.

<sup>12</sup> Source : Infoterre.brgm.fr

## 2.2 Histoire générale du massif

Concernant la forêt de Saint Gobain, les recherches palynologiques et historiques nous permettent de reconstituer trois grandes périodes concernant l'évolution paysagère du Laonnois : de l'Atlantique au Subatlantique, au Moyen-Âge et du XV<sup>ème</sup> au XIX<sup>ème</sup> siècles. L'Antiquité n'est pas prise en considération car nous ne disposons pas de données archéologiques sur le secteur, tout comme la période d'après 1815 en raison de la destruction des archives forestières.

### *De l'Atlantique au Subatlantique (-8000 à -1500 ans BP)*

Les recherches biogéographiques de Barthélémy (1970) ont décelé différentes associations végétales fondées sur les analyses palynologiques<sup>13</sup>. Les premières formations apparaissent à la période atlantique avec deux types de milieux :

(i) Les zones ouvertes avec céréales, pins et bouleaux reflétant le début d'une anthropisation du paysage de par les défrichements et l'agriculture.

(ii) Une occupation forestière avec la présence de chênes, de noisetiers et de frênes.

Dans la phase intermédiaire du Subboréal, apparaissent les mêmes distinctions avec des zones cultivées et une occupation forestière majoritairement par des tilleuls avec la continuité des chênes et du noisetier.

L'époque Subatlantique se définit par la disparition des formations ouvertes au profit de deux types de forêts : la chênaie et la chênaie-hêtraie. L'absence d'indices de culture ou de pâturage témoigne en faveur d'une dominance de forêt dans le paysage en raison de l'abandon des terres par l'homme.

### *Le Moyen-Âge : les implantations religieuses.<sup>14</sup>*

Les grands territoires forestiers du Laonnois existaient déjà au Moyen-Âge où ils étaient des propriétés royales d'héritage mérovingien ou ecclésiastiques. Saint Gobain, avant de devenir royale au XV<sup>ème</sup> siècle, comme la plupart des domaines des monarques du nord de Paris, a été cédée par le royaume franc à Saint Amant, un ermite irlandais, au VIII<sup>ème</sup> siècle, donfateur d'un ermitage en pleine forêt qui perdura jusqu'au début du XX<sup>ème</sup> siècle. Plus tard, au X<sup>ème</sup> et XI<sup>ème</sup> siècles, l'essor de l'ordre bénédictin et la nécessité pour les moines de vivre à l'écart des cités, dans des lieux propices à une retraite spirituelle où une ressource énergétique et alimentaire était disponible, conduisirent à l'implantation de grandes abbayes dans le Laonnois et notamment celle de St Nicolas-aux-Bois, située au nord de la forêt de St Gobain. Ces intrusions humaines en forêt attestent de la continuité temporelle du couvert boisé mais également des fortes perturbations et des aménagements que St Gobain connut durant cette période. La gestion forestière exercée à cette époque par les religieux et les communes était sérieusement décriée car souvent abusive et non durable. S'ajoutent à cela les droits d'usages, qui consistent en des prélèvements de bois mort, mort bois ou encore du pâturage, de la récolte de graines (faines, glands) par les paroissiens (habitants vivant sur les terres d'une paroisse). Ces droits, bien que précaires dans leurs attributions car soumis à la bonne volonté du pouvoir en place, ont également impacté de manière considérable la ressource forestière.

<sup>13</sup> Un rappel des différentes phases climatiques est fourni en appendice 2.

<sup>14</sup> Buridant 1999

### Du XV<sup>ème</sup> au XIX<sup>ème</sup> siècle : l'industrie verrière.<sup>15</sup>

Le massif de Saint Gobain est connu pour être la première forêt gérée par Jean-Baptiste Colbert<sup>16</sup> et pour sa tradition verrière qui remonte au XV<sup>ème</sup> siècle. Les régions voisines étaient, à cette époque, en plein essor industriel sidérurgique. Les forges s'installaient en forêt et les ouvrages miniers se multipliaient. Cette occupation de l'homme au sein des peuplements est d'ailleurs la cause première des incendies. Le territoire forestier picard étant par nature peu enclin à s'enflammer, les rares accidents pouvaient survenir lors d'années exceptionnellement sèches ou en raison de l'emploi du feu par les nombreux usagers de la forêt : sabotiers, charbonniers, verriers, forgerons, bergers pour l'entretien des pâtures et bûcherons par le brûlage des rémanents de l'exploitation forestière. Deux épisodes de feux datant du XVII<sup>ème</sup> siècle sont connus sur la forêt de Saint Gobain, à l'est du massif, et ne concernent pas directement notre zone d'étude (Figure 7). Des incendies antérieurs ou postérieurs à la période couverte par les archives ont pu se produire. Des sécheresses importantes sont d'ailleurs notées au XIX<sup>ème</sup> siècle et en 1920.

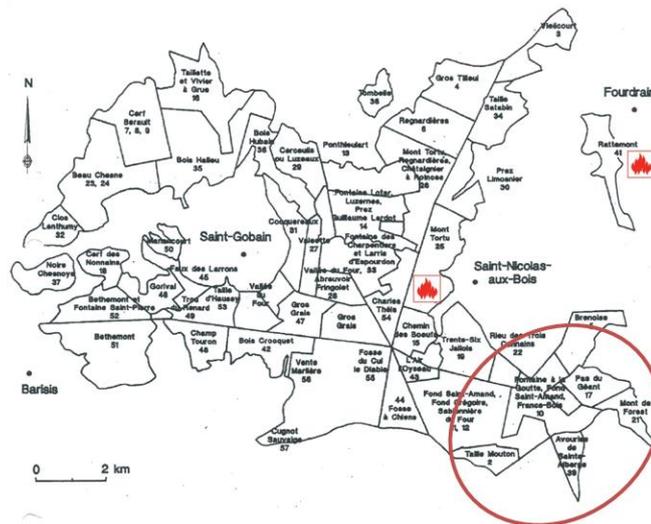


Figure 7 : Carte des unités d'étude du massif. Les symboles rouges indiquant les feux connus, le **cercle rouge** la zone d'étude (Buridant 1999).

Le territoire de Saint Gobain ne bénéficie pas de filons de fer dans son sous-sol, mais dispose en revanche d'abondantes ressources forestières et sableuses, c'est pourquoi la verrerie s'y est naturellement développée. Les premiers établissements de la forêt datent du XV<sup>ème</sup> siècle et étaient des verreries de menu-verre, c'est-à-dire des manufactures de bouteilles et gobelets. Elles s'implantent après la Guerre de Cent ans grâce à la migration des verriers lorrains en Picardie et en Normandie. Du XVI<sup>ème</sup> au XVIII<sup>ème</sup> siècle, cette industrie va connaître sa pleine croissance avec l'apparition de la haute verrerie et notamment *la Manufacture royale des grandes glaces*, fusion entre une entreprise locale et la compagnie des glaces du faubourg Saint Antoine, qui s'installe à Saint Gobain en 1695. L'objectif est ici de concurrencer les produits des artisans de Venise. Cette manufacture va devenir, avec les hauts-fourneaux de Rotheau en Lorraine, l'une des entreprises les plus consommatrices de bois en France avec, pour Saint Gobain, autour des années 1770, 30 000 stères de bois de feu consommés à l'année. La Manufacture exigeant dans sa globalité (3 verreries) des

<sup>15</sup> Buridant 1999

<sup>16</sup> Maître d'œuvre de la grande réformation suite à la publication de l'Ordonnance de 1669.

apports en bois encore plus importants avec près de 80 643 stères par an (Tableau 1). Elle va donc absorber l'ensemble du marché du bois et conduire à l'élimination des autres verreries artisanales.

Tableau 1 : Approvisionnement de bois pour la Manufacture Royale au XVIII<sup>ème</sup> siècle (Buridant 1999).

Surface (ha)	Révolution	Surface en coupe (ha/an)	Récolte annuelle (stère)
8236.2	25-30	267.4	80 643

La gestion forestière a donc été optimisée pour répondre à cette forte demande qui se traduisait par une intensification des prélèvements et une exigence dans la qualité des produits (essence, diamètre). Pour ce faire, des modifications sylvicoles considérables ont été apportées sur l'aménagement du massif et sur les droits d'usages qui ont été contrôlés, administrés et progressivement diminués. Vigilance et répression accrues étaient de mises afin de réduire au maximum les exploitations illégales. En témoignent l'augmentation du nombre des délits forestiers consignés au XVII<sup>ème</sup> siècle et sa diminution à la fin du XVIII<sup>ème</sup> due à l'impact de cette politique (Figure 8). Le principal de ces délits était la coupe de branches ou d'arbres vivants.

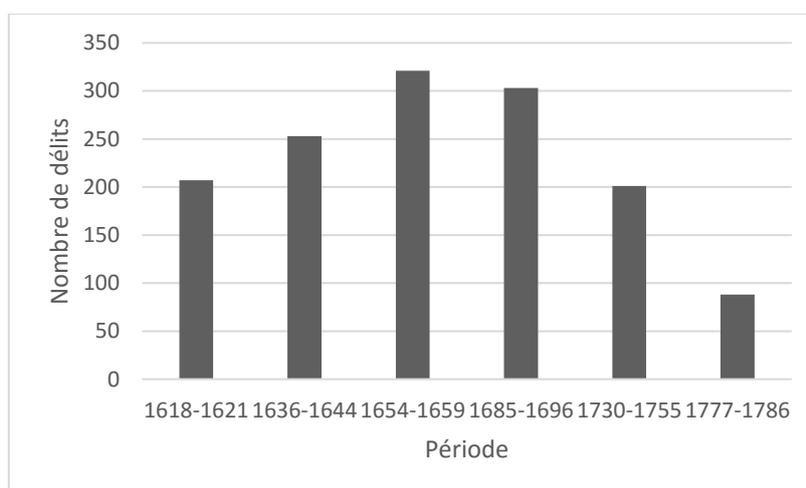


Figure 8 : Nombre de délits forestiers recensés pour la maîtrise de La Fère (Buridant 1999).

Avant le XVII<sup>ème</sup> siècle, cette propriété royale était gérée à part égale selon un régime de futaie irrégulière et de mélange futaie-taillis. L'exploitation des bois était maniée selon les besoins, sans programmation des coupes. Philippe de Longueval, maître gruyer des eaux et forêts, décrit Saint Gobain en situant des zones de futaie au sud-est, donc de peuplement âgé, alors que le nord et l'est étaient composés de jeunes forêts, traitées en mélange futaie-taillis.

A partir du XVII<sup>ème</sup> siècle, l'ensemble du domaine est converti en taillis-sous-futaie (Figure 9) et cela pour deux raisons :

- (i) Obtenir du bois de chauffage pour la capitale.
- (ii) Répondre aux besoins spécifiques de l'industrie verrière.

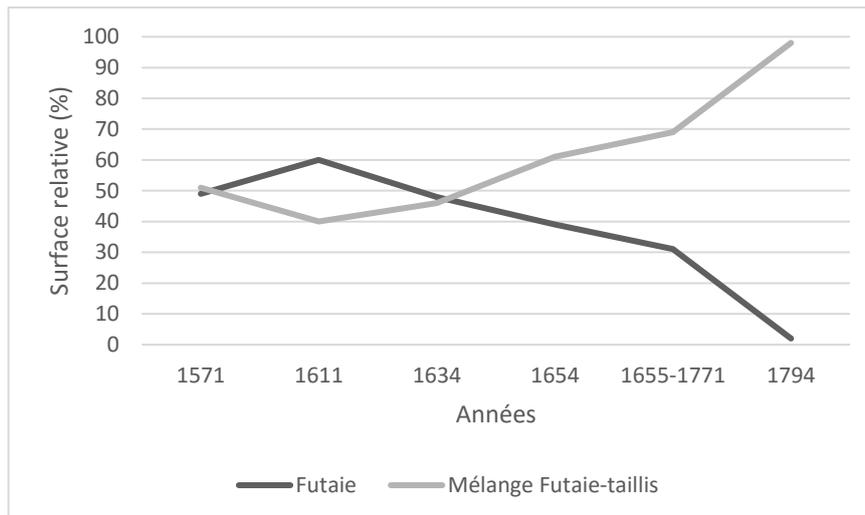


Figure 9 : Changement dans le traitement de la forêt de St Gobain du XVI<sup>ème</sup> au XVIII<sup>ème</sup> siècle (Buridant 1999).

Les prélèvements sont donc organisés, programmés dans le temps, et les révolutions du taillis sont fixées sur une fourchette de 15-25 ans pour le bois de feu et de 25-35 ans pour le bois de verreries. En effet, la Manufacture des glaces nécessitait des produits au plus grand pouvoir calorifique et donc de plus gros diamètre. Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, la demande de l'industrie verrière dépasse celle du bois de chauffe et les révolutions sont donc globalement allongées ainsi que les effectifs de baliveaux par hectare pour pérenniser la futaie.

Les archives précisent que l'exploitation des souches était prohibée, sauf si la capacité à rejeter se révélait nulle ou s'il s'agissait d'essences précieuses. Ce paramètre est important car l'impact sur les sols est considérable dans le cas d'une exploitation totale de la biomasse ligneuse. Précisons également que les forêts laonnoises sont peu enclines à la production de charbon de bois en raison d'une demande insuffisante. Les rares productions de charbon servent à la fabrication de la poudre explosive et à alimenter quelques verreries locales de menu-verre.

Concernant la taille du domaine, la stabilité de sa surface depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle témoigne d'une pratique durable de la sylviculture par rapport à ce contexte industriel (Figure 10).

La gestion intensive de la forêt prendra fin au XIX<sup>ème</sup> siècle avec l'apparition du charbon fossile qui viendra remplacer le bois dans l'industrie verrière et dans le chauffage domestique. Progressivement l'intérêt des mélanges futaie-taillis va perdre du terrain face à celui de la futaie régulière dont l'école forestière de Nancy fera la promotion dès sa fondation en 1824.

Le domaine forestier de Saint Gobain est le reflet d'un façonnage humain lié aux usages et aux implantations religieuses durant le Moyen-Âge mais surtout à la grande industrie verrière pendant au moins trois siècles consécutifs. Les archives anthracologiques doivent probablement témoigner de cette histoire marquante et afficher une abondance ou des taxons reflétant une gestion forestière intensive.

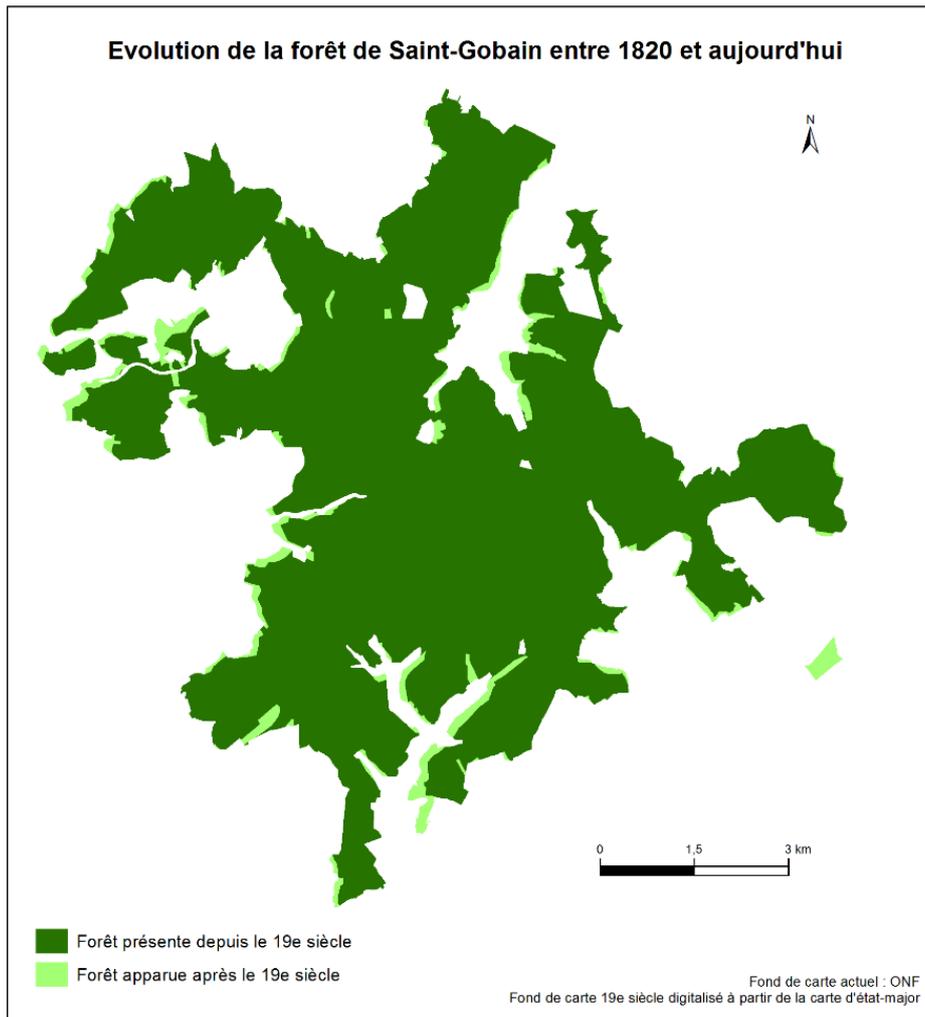


Figure 10 : Carte de l'évolution forestière de Saint Gobain depuis 1820.



## 2.3 Sites d'études<sup>17</sup>

Pour nous garantir à faible distance une diversité de sol, nous avons choisi de travailler dans la partie principale de la forêt, située sur la butte témoin (Figure 11). Trois sites, sélectionnés en position de plateau, ont été étudiés dans les trois conditions pédologiques citées précédemment : podzol, cambisol et luvisol (Figure 12).

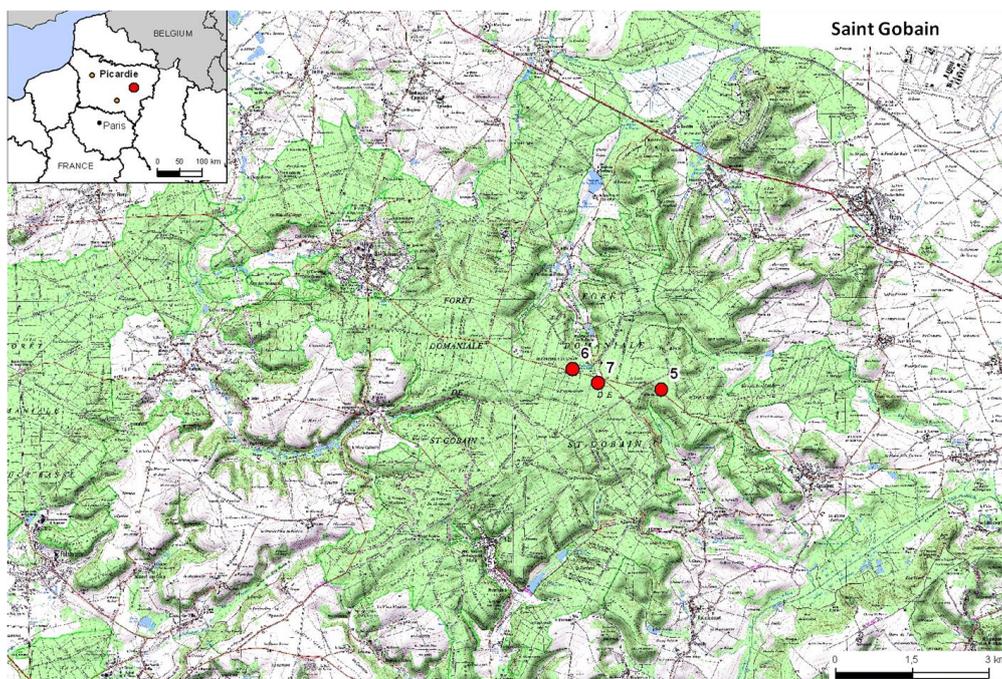


Figure 11 : Carte de localisation des sites d'études à Saint Gobain. (5) pour cambisol, (6) pour podzol et (7) pour luvisol.

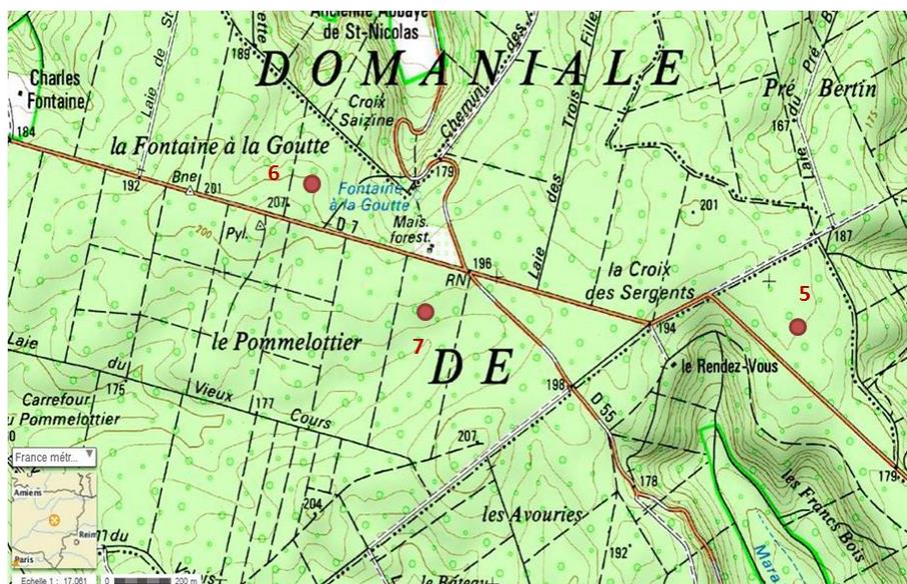


Figure 12 : Localisation des parcelles étudiées en forêt de Saint Gobain.

<sup>17</sup> Les numéros de sites vont de 5 à 7 pour Saint Gobain et de 8 à 10 pour Compiègne. Les sites 1 à 4 étant des placettes expérimentales.

### 2.3.1 Le podzol de Saint Gobain

Cette première placette est localisée dans la parcelle 1015 (Figure 12, n°6). Nous avons identifié ici un peuplement forestier de type futaie régulière à gros bois (diamètre > 70 cm), composé de chênes essentiellement (*Quercus robur*, *Quercus petraea*) accompagnés de diverses essences non concurrentielles, telles que le charme (*Carpinus betulus*), le bouleau (*Betula pendula*), le tilleul (*Tilia cordata*) et le châtaignier (*Castanea sativa*). Les autres espèces ligneuses de la parcelle sont le coudrier (*Corylus avellana*) et le lierre (*Hedera helix*).

Les registres des Eaux et Forêts de 1675 à 1781 (Buridant 1999) indiquent que sur ce triage appelé « Rieu des Trois Connains » (Figure 7) géré en taillis-sous-futaie, les chênes dominaient déjà le peuplement accompagné du hêtre, aujourd'hui absent.

Si on excepte quelques anciens chablis, le microrelief est très faible sur cette parcelle et aucune trace d'activités de la faune du sol (lombric, taupe...) n'a été repérée.

Le profil de sol a été décrit sur 160 cm de profondeur. Avec un humus de type hemimoder, la structuration des horizons, Ah-Ae-Bs-C (Figures 13 et 14), a permis d'identifier un podzol de type ocre podzolique reposant sur les Sables du Bartonien. Les différents niveaux sont dominés par la texture sableuse, en mélange avec une faible part de limon et d'argile. L'enracinement est présent sur tout le profil mais diminue avec l'apparition de l'horizon Bs. Des blocs de grès sont régulièrement répartis sur l'ensemble du profil. Le pH augmente avec la profondeur (Tableau 2).

La faible différenciation des horizons révèle un sol peu évolué, révélateur d'une ambiance forestière pérenne.



Figure 13 : Illustration du profil de sol du podzol de Saint Gobain.

Code site : FDSGsite6  
 Altitude : 200m  
 Topographie : Plateau  
 Substrat : Sableux  
 Végétation : Chênaie-hêtraie  
 Date de l'observation : 29.02.2012  
 Type pédologique : Podzols

### Description morphologique

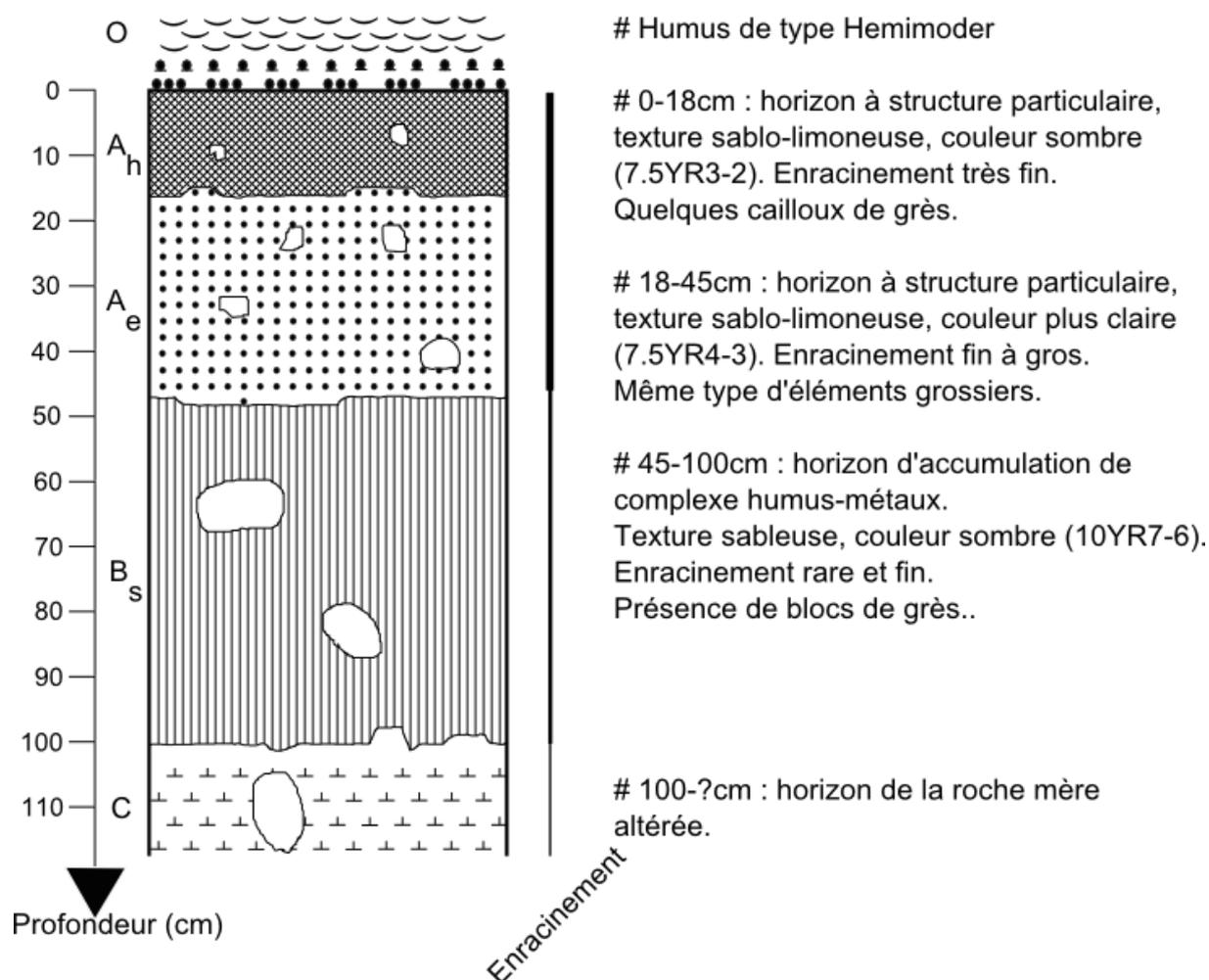


Figure 14 : Profil pédologique du podzol de Saint Gobain.

Tableau 2 : Caractérisation physico-chimique des horizons du podzol de Saint Gobain.

Profondeur (cm)	Couleur (sol humide)	pH H <sub>2</sub> O	EG %	Racines %	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)
Ah 0-18	7.5 YR 3/2	3.94	5	15	6.06	8.61	22.02	48.53	14.78
Ae 18-45	7.5 YR 4/3	4.3	15	20	13.24	13.95	18.10	35.59	19.12
Bs 45-100	10 YR 7/6	4.44	15	16	10.96	5.01	6.73	45.65	31.65
C 100		5.07	0	0	-	-	-	-	-

### 2.3.2 Le cambisol de Saint Gobain

Le choix d'emplacement de cette placette a été arrêté sur la parcelle 25 (Figure 12, n°5), une des rares parcelles forestières établies sur un sol calcaire en condition de plateau. Le peuplement est une futaie régulière au stade gaulis (3 à 6 m de hauteur, diamètre < 5 cm). Les cloisonnements sylvicoles y sont disposés selon un écartement de 12 m. En raison du stade sylvicole, un plus grand nombre d'espèces ligneuses ont été inventoriées sur ce site (15) : hêtre (*Fagus sylvatica*), chênes (*Quercus sp*), bouleau (*Betula pendula*), charme (*Carpinus betulus*), coudrier (*Corylus avellana*), tremble (*Populus tremula*), fusain (*Euonymus europaeus*), cornouiller sanguin (*Cornus sanguinea*), érable champêtre et sycomore (*Acer campestre*, *Acer pseudoplatanus*), tilleul (*Tilia cordata*), frêne (*Fraxinus excelsior*), troène (*Ligustrum vulgare*), lierre (*Hedera helix*) et clematite (*Clematix vitalba*).

Dans de telles conditions de peuplement, aucun microrelief n'a été détecté. Les turricules et les taupinières sont abondants et des charbons sont visibles dans la terre remaniée par les taupes.

Les anciens martelages de 1612 à 1787 (Buridant 1999) précisent que sur ce triage appelé « Mont de Forest » (Figure 7), le peuplement était un taillis ordinaire de chênes et hêtre en mélanges, accompagnés de charmes.

Avec un humus oligomull, une abondance de racines sur tout le profil et du calcaire actif à chaque niveau (pH élevé), les horizons du sol se hiérarchisent de la manière suivante : Ah-(B)-Bt-C, où C est la roche mère de calcaire altérée (Figures 15 et 16). La texture est principalement limono-argileuse (Tableau 3).

Le profil est très homogène et n'indique pas de perturbations anciennes liées à des changements d'usages.



Figure 15 : Profil pédologique du cambisol de Saint Gobain.

Code site : FDSGsite5  
 Altitude : 190m  
 Topographie : Plateau  
 Substrat : Calcaire  
 Végétation : Hêtraie-charmaie  
 Date de l'observation : 29.02.2012  
 Type pédologique : Cambisols

### Description morphologique

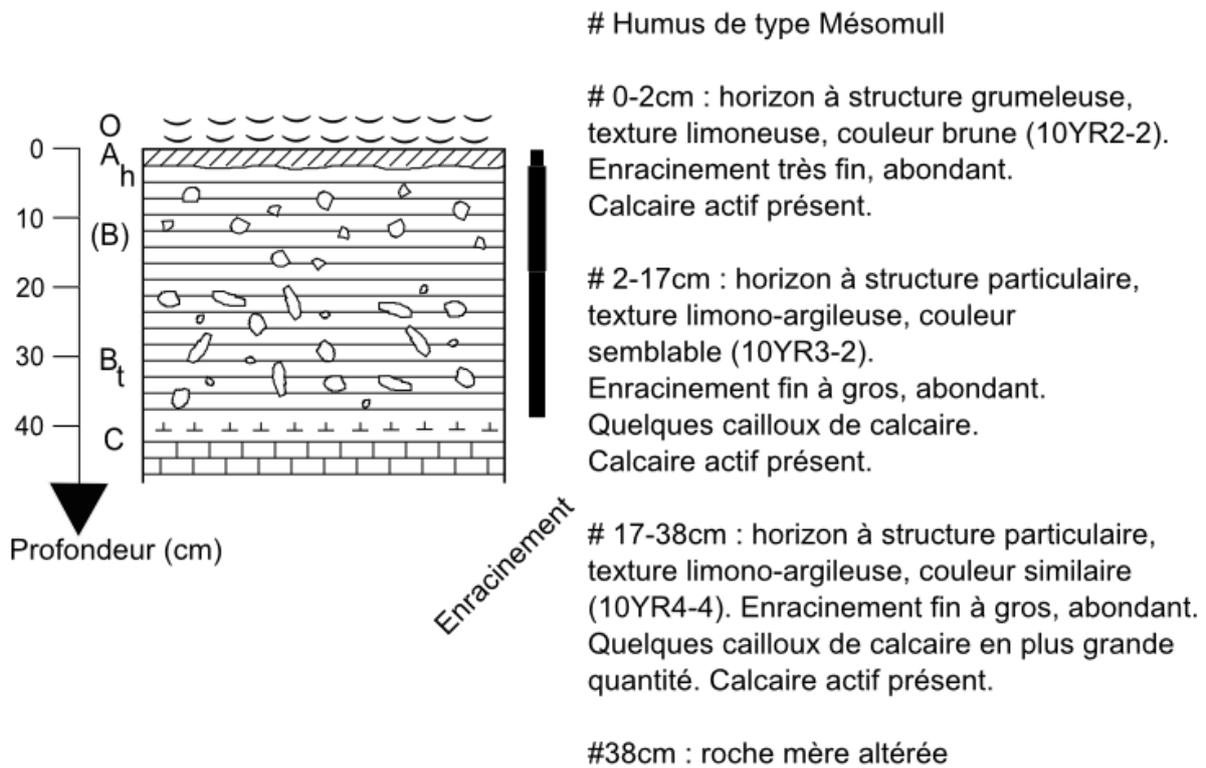


Figure 16 : Profil pédologique du cambisol de Saint Gobain.

Tableau 3 : Caractérisation physico-chimique des horizons du cambisol de Saint Gobain.

Profondeur (cm)	Couleur (sol humide)	pH H <sub>2</sub> O	EG %	Racines %	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)
Ah 0-2	10 YR 2/2	7.71	0	30	14.74	19.61	21.31	31.97	12.36
(B) 2-17	10 YR 3/2	7.82	15	40	19.94	21.53	22.72	23.92	11.89
Bt 17-38	10 YR 4/4	8	25	35	21.71	26.66	26.19	23.41	2.03
C 38	-	8.08	100	-	21.81	22.41	21.89	27.80	6.09

### 2.3.3 Le luvisol de Saint Gobain

Situé en parcelle 1020 (Figure 12, n°7), le luvisol de Saint Gobain est caractérisé par un peuplement forestier de type futaie régulière de structure gros bois (diamètre > 70 cm) composée principalement de hêtre (*Fagus sylvatica*) et de chênes (*Quercus robur*, *Quercus petraea*). Les essences accompagnatrices sont le merisier (*Prunus avium*), le charme (*Carpinus betulus*), le bouleau (*Betula pendula*) et l'érable champêtre (*Acer campestre*). D'autres essences ligneuses sont identifiées : le coudrier (*Corylus avellana*) et l'aubépine monogyne (*Crataegus monogyna*).

Les anciens registres de 1657 à 1782 (Buridant 1999) spécifient que le peuplement de ce triage de la « Fontaine à la goutte » (Figure 7), était un taillis ordinaire de type chênaie-charmaie accompagné de hêtre, aujourd'hui dominant.

Le microrelief est marqué par d'ancien chablis. De très nombreux turricules et taupinières couvrent la surface du sol. A nouveau, les taupinières affichent une forte abondance en charbons.

L'humus est un dysmull, l'enracinement y diminue fortement après 40 cm et la texture y est dominée par le limon. Ce sol présente les horizons Ah-Ae-B-Bt typique du sol lessivé (Figures 17 et 18), le pH évoluant peu avec la profondeur (Tableau 4).



Figure 17 : Profil pédologique du luvisol de Saint Gobain.

Code site : FDSGsite7  
 Altitude : 190m  
 Topographie : Plateau  
 Substrat : Limon  
 Végétation : Hêtraie-chênaie  
 Date de l'observation : 01.03.2012  
 Type pédologique : Luvisols

### Description morphologique

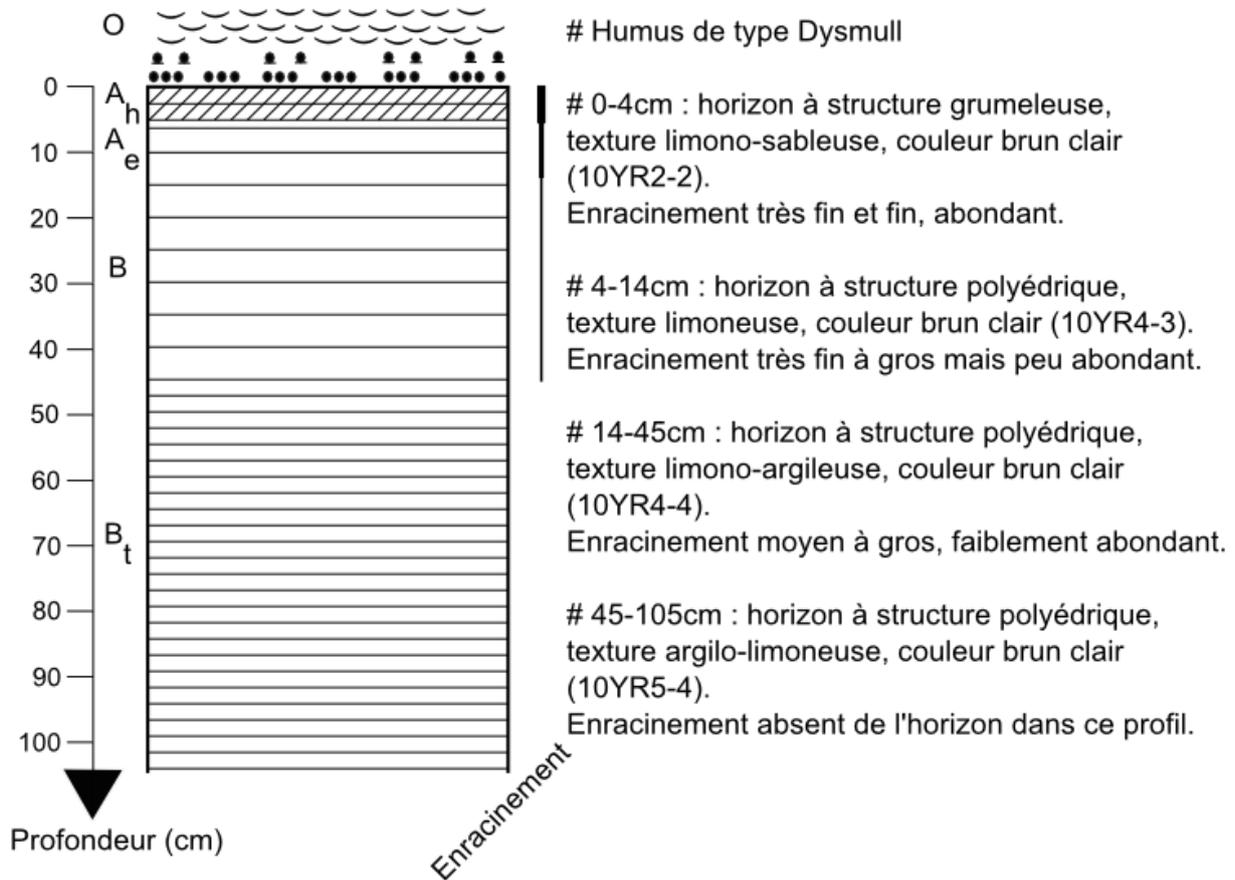


Figure 18 : Profil pédologique du luvisol de Saint Gobain.

Tableau 4 : Caractérisation physico-chimique des horizons du luvisol de Saint Gobain.

Profondeur (cm)	Couleur (sol humide)	pH H <sub>2</sub> O	EG %	Racines %	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)
Ah 0-4	10 YR 2/2	4.39	0	40	16.39	26.48	36.41	18.65	2.08
Ae 4-14	10 YR 4/3	4.39	0	30	16.39	26.48	36.41	18.65	2.08
B 14-45	10 YR 4/4	4.57	0	15	24.83	22.44	36.76	15.97	0.00
Bt 45-105	10 YR 5/4	5.12	0	5	17.85	18.78	46.76	16.61	0.00

### 3. La forêt de Compiègne

Plus grand massif boisé de Picardie avec ses 14 357 ha, troisième propriété domaniale de la France métropolitaine, avec un potentiel de production fort de 6 m<sup>3</sup>/ha/an et bientôt labélisée « *Forêt d'exception*® », la forêt de Compiègne est surtout connue de par les personnages emblématiques qui l'ont fréquentée, comme François 1<sup>er</sup>, Louis XIV ou encore Napoléon Bonaparte. Ancien territoire de chasse royale, Compiègne se situe à seulement 80 km au nord de Paris. Les 40 000 habitants de la ville de Compiègne, 72 000 dans l'agglomération, et la proximité de la capitale font de ce massif un territoire très fréquenté par le grand public. Les enjeux y sont donc multiples avec le tourisme vert qui prend chaque année de l'ampleur, la production forestière de qualité et la mise en valeur du patrimoine naturel (totalité du massif en Zone de Protection Spéciale<sup>18</sup>), historique et archéologique.

#### 3.1 Géologie

La forêt repose dans une cuvette avec plusieurs étages géologiques d'origine sédimentaire disposés en cercles concentriques depuis le sud et le nord-est du domaine<sup>19</sup>. Le massif est délimité par la vallée de l'Oise, à l'ouest, la vallée de l'Aisne, au nord et un plateau plus élevé qui s'étend du sud au nord-est, composé de buttes témoins. L'altitude varie de 38 à 148 m. La coupe géologique simplifiée ci-dessous (Bournerias *et al.* 2001), nous montre que les parties hautes de la forêt, situées sur le plateau au sud-est du massif, sont composées d'une couche de limon lœssique et sableuse mesurant par endroits plusieurs mètres de profondeur (Figure 19, n°1) ; juste en dessous, un niveau de calcaire du Lutécien (Figure 19, n°2) qui constitue les sommets des buttes et un autre niveau très fin d'argile de Laon (Figure 19, n°3).

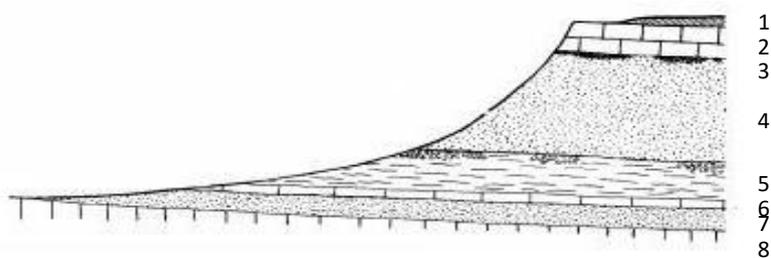


Figure 19 : Coupe géologique simplifiée de la forêt de Compiègne.

Le flanc des collines et buttes témoins est composé du sable de Cuise (Figure 19, n°4), parfois calcaire ou argileux, qui en s'érodant peut former des couches importantes de colluvions en bas de pente. En bas du profil, on identifie, au sein des deux niveaux de calcaires de Mortemer et de la roche mère de Craie (Figure 19, n°6 et 8), une couche de sable de Bracheux (Figure 19, n°7) d'origine marine qui en s'érodant est remaniée par l'action du vent pour former, avec les sables de Cuise, des sables de couverture, présents sur la partie sud-est du massif Compiégnois.

<sup>18</sup> N°FR2212001, Directive Européenne Oiseaux.

<sup>19</sup> Source : Infoterre.brgm.fr

La diversité de ces affleurements géologiques permet de rencontrer une grande diversité pédologique et stationnelle.

### 3.2 Histoire générale du massif

Les recherches palynologiques, anthracologiques, archéologiques et historiques offrent l'opportunité de retracer une partie de l'histoire de la forêt de Compiègne. Les données pédoanthracologiques de notre étude gagneront ensuite à être intégrées dans ce cadre historique de l'évolution de la végétation en interaction avec les occupations et pratiques humaines.

#### *La végétation du Préboréal au Subatlantique (-9500 à -2000 BP)*

Il existe peu de véritables études paléoécologiques régionales en Picardie. Pour le secteur de Compiègne, seules les recherches palynologiques en contexte archéologique nous offrent une reconstitution de la végétation pour les périodes du Préboréal, du Subboréal et du Subatlantique (Malrain *et al.* 2006). Les prélèvements connus sont issus de la Croix-Saint-Ouen, une commune localisée en bordure de l'Oise, à 5 km au sud de la ville de Compiègne et à seulement 2 km à l'ouest de la forêt domaniale. Au Préboréal, les pins dominent le paysage devant le noisetier et d'autres ligneux comme les chênes et l'aulne. A cette période, la végétation herbacée est rare à proximité du site. Le Subboréal se démarque par une diversité dans les enregistrements indiquant de multiples écosystèmes engendrés par une anthropisation plus marquée. Le paysage est davantage morcelé avec une alternance de zones ouvertes, d'aulnaies (ripisylves bordant l'Oise) et de chênaies-hêtraies. Au Subatlantique, le hêtre est davantage présent et le charme apparaît dans les enregistrements polliniques.

#### *L'occupation du paysage du Néolithique jusqu'à la Tène*

Les travaux de Pernaud (1997), fondés sur une approche anthracologique en contexte archéologique, nous proposent une lecture du paysage compiégnois du Néolithique récent à la Tène ancienne. Les restes carbonisés proviennent à nouveau des deux sites situés sur le territoire de la Croix-Saint-Ouen.

Le paysage du Néolithique était alors constitué de deux écosystèmes : (i) une ripisylve de type aulnaie et (ii) une forêt de chênes (54.9% des fragments) où une augmentation du frêne entre le Néolithique récent (10 fragments) et final est identifiée (719 fragments). Le hêtre apparaît au Néolithique final en faible proportion (0.1%). Ce constat est en adéquation avec la phase d'installation de la hêtraie postglaciaire (4000 ans BP) dans le nord de la France. Les données archéozoologiques de ces sites montrent que la faune chassée était forestière ou semi-forestière (cerf, sanglier), corroborant une ambiance sylvicole à proximité.

L'occupation de ces sites durant la Tène ancienne nous révèle, à travers les charbons de bois, que le paysage était beaucoup plus marqué par l'anthropisation avec l'existence d'au moins trois biotopes : (i) une ripisylve, toujours en accord avec la proximité directe de l'Oise, (ii) des bocages avec une abondance de taxons de la famille des Rosacées et (iii) la chênaie-hêtraie, largement dominée par le chêne (42%) mais où le hêtre a gagné en abondance (6%) depuis le Néolithique final.

Les données palynologiques disponibles pour le secteur de Compiègne (Malrain *et al.* 2006) correspondent, pour la phase subatlantique, à la période de la Tène. Elles indiquent un

paysage très ouvert avec, une ripisylve d’aulne sur les bords de l’Oise, la présence d’espèces héliophiles et nitrophiles de prairies humides pâturées et des espaces forestiers clairiérés où le pin, le noisetier et d’autres espèces héliophiles sont présents. La chênaie-hêtraie est rare dans les profils palynologiques de cette période.

Ces données anthracologiques et palynologiques se prononcent en faveur d’un paysage diversifié et impacté par l’homme dès le Néolithique. Bien qu’elles proviennent de la vallée de l’Oise, en périphérie de l’actuelle forêt de Compiègne, elles nous permettent d’appréhender les espèces forestières qui se trouvaient sur le secteur, et de constater une évolution de la pinède vers la chênaie puis la chênaie-hêtraie avec, en parallèle, le développement d’autres espèces héliophiles et/ou fruitières favorisées par les pratiques agraires des hommes.

### *L’occupation romaine*

Les trois cents vestiges gallo-romains en forêt de Compiègne attestent d’une très forte anthropisation durant l’Antiquité, notamment sur la partie sud, sud-est du massif (Figure 20), autour de l’ancienne voie romaine reliant Soissons à Senlis, dénommée aujourd’hui la « Chaussée Brunehaut ». La nature de ces structures nous indique que les terres étaient destinées à l’agriculture : *villae*, parcelles, mares d’habitats.

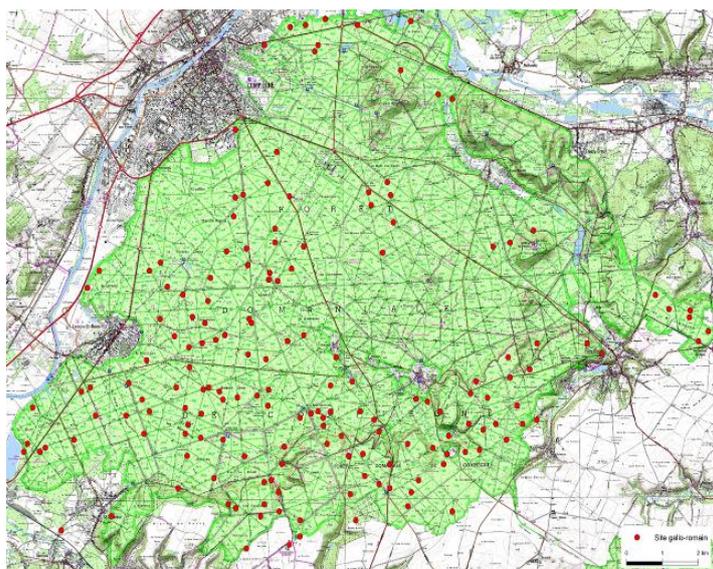


Figure 20 : Carte des sites antiques (points rouges) en forêt de Compiègne (Thuillier P.).

Le traitement des données de la campagne LIDAR de 2014<sup>20</sup> permet d’étayer le fait que durant l’Antiquité le territoire était cultivé. Dans la zone sud de la forêt, au niveau du site 10 luvisol (présenté ci-après), des structures de types linéaires et surfaciques sont révélées (Figure 21). La présence de ces micro-reliefs anthropiques se corrèle avec les nombreux sites archéologiques de l’époque Gallo-Romaine localisés dans ce secteur, dont la chaussée Brunehaut. L’absence de relief visible sur le terrain alliée à un profil de sol très homogène (voir point 3.4.1) corrobore cet épisode de changement d’usage ancien.

<sup>20</sup> L’ensemble du massif a été survolé mais les données sont en cours de traitement.

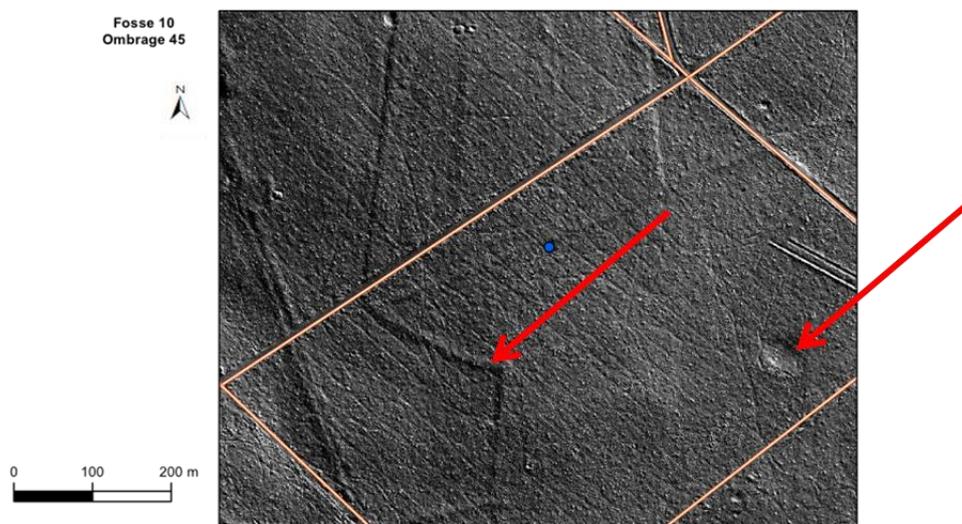


Figure 21 : Cartographie des anomalies topographiques pour le site luvisol Compiègne. Le point **bleu** représente la fosse pédologique, les lignes **orangées** indiquent le réseau de dessertes actuel et les flèches **rouges** les reliquats de l'usage agricole de la terre à l'antiquité.

Les fours verriers datant du 1<sup>er</sup> ou 2<sup>ème</sup> siècle de notre ère (Sautai-Daussin 1973) révèlent cependant une ressource ligneuse à proximité.

Les travaux de Fémolant (1996) recensent et géoréférencent, sur le département de l'Oise, les fermes gauloises et *villae* découvertes, parfois fouillées. Ils font également apparaître plusieurs structures agraires en forêt de Compiègne et à proximité directe (vallée de l'Aronde au nord-ouest), révélant un territoire fortement organisé par l'homme (Figure 22).

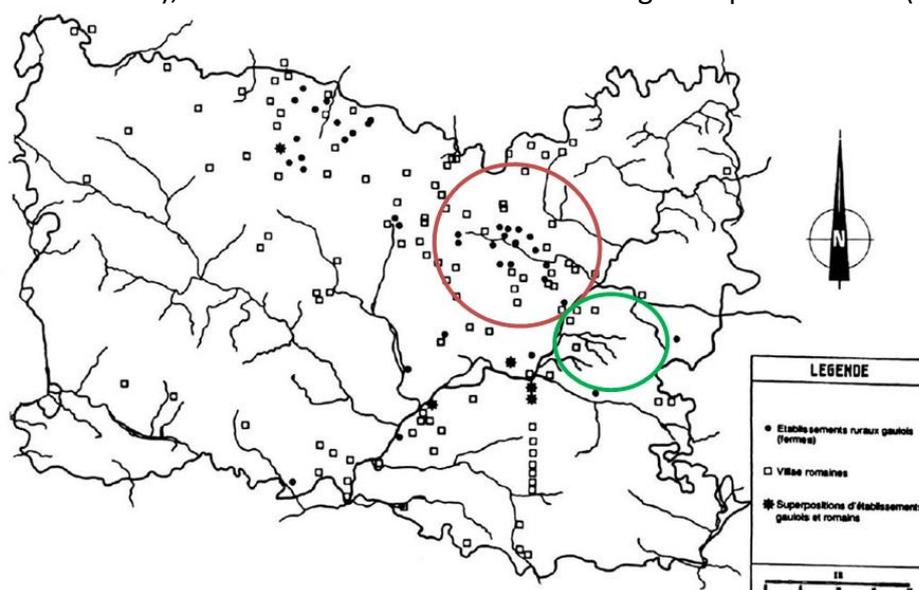


Figure 22 : Répartition des établissements ruraux gaulois et des *villae* dans l'Oise (Fémolant *et al.* 1996). **Cercle rouge** : la vallée de l'Aronde riche en vestiges. **Cercle vert** : la forêt de Compiègne.

Le paysage antique de Compiègne devait donc être composé de zones ouvertes destinées à la culture et de zones boisées nécessaires en tant que ressource énergétique.

#### *Le développement forestier du Moyen-Âge*

Les recherches historiques (Thuillier P. ; Doyen et al. 2004) ont montré que l'extension de la forêt de Compiègne a eu lieu au Moyen-Âge. A cette période, la ville de

Compiègne est en pleine croissance, favorisant sans doute l'entretien d'une ressource forestière à proximité de la cité. Au VI<sup>ème</sup> siècle, le roi franc Clotaire 1<sup>er</sup> meurt dans les murs de la ville de Compiègne après un épisode de chasse en forêt de Cuise (Compiègne) : ce fait majeur de l'histoire des rois de France atteste de la présence de la forêt dès le haut Moyen-Âge. La forte présence de vestiges industriels dans le domaine (Figure 23) indique que le territoire était déjà sylvicole : fours de verriers et activités sidérurgiques sont mentionnés par Sautai-Daussin (1973) et Jakubowski (1997), pour la période du IX<sup>ème</sup> siècle au XV<sup>ème</sup> siècles.

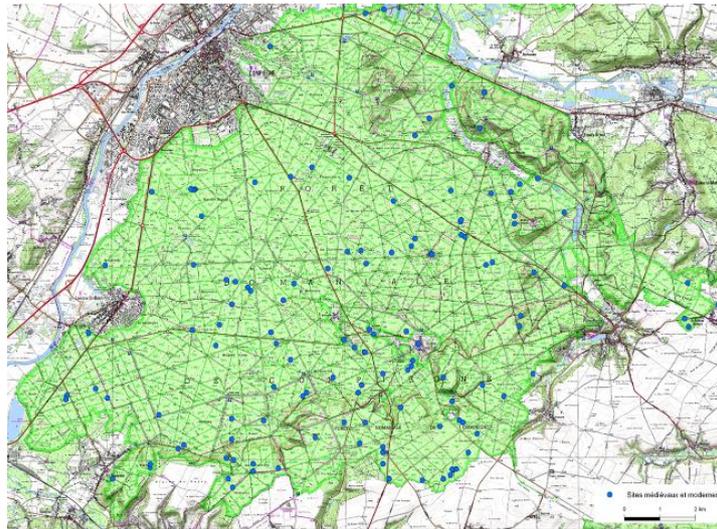


Figure 23 : Carte des sites médiévaux (points bleus) en forêt de Compiègne (Thuillier P.).

L'occupation des sols est en revanche très diversifiée, mêlant industrie, sylviculture, chasse et agriculture. Tout comme à Saint Gobain, les droits d'usages sont appliqués sur le massif (Bocquillon 2000) et causent bon nombre de problèmes. Cela concerne principalement le pâturage des bêtes aumailles (vaches) et le panage des porcs qui affectent sérieusement la végétation forestière et nuisent à la régénération des peuplements de futaie ainsi qu'au rejet des souches du taillis.

C'est également au Moyen-Âge que débutent les aménagements cynégétiques de la forêt, instaurés par la royauté. Les garennes à lapin (*Oryctolagus cuniculus*) sont aménagées au sud du massif pour implanter une population de petit gibier destinée à la chasse. Plusieurs générations d'agronomes, de 1583 à 1834, ont d'ailleurs préconisé l'implantation de certaines essences<sup>21</sup> dans le but d'apporter nourriture et abris aux lapins, impactant de la sorte les communautés végétales locales. Notons que le site d'étude sur luvisol (paragraphe 3.4.1) est à mettre en lien avec ces éléments car présent dans une ancienne zone de garenne.

Cette période se caractérise aussi par l'implantation dans le massif d'institutions religieuses avec la création d'abbayes accompagnées d'étangs de pisciculture nécessaires au mode de vie de la communauté.

<sup>21</sup> Appendice 3

*La forêt de Compiègne : du XVI<sup>ème</sup> siècle à nos jours*<sup>22</sup>

L'utilisation du domaine royal pour la chasse s'est fortement développée dès le XVI<sup>ème</sup> siècle avec le succès de la vénerie à laquelle se rajoute au XVIII<sup>ème</sup> le tir aux faisans. François I<sup>er</sup> va aménager la forêt en faisant tracer huit routes d'accès. Ce chantier sera repris plus tard par Louis XIV qui fera bâtir le premier carrefour en étoile français et tracer 54 routes supplémentaires : le but étant de faciliter la chasse à courre en suivant le parcours du gibier depuis le centre de l'étoile et en lançant la meute de chiens au moment opportun. La création des routes et voies d'accès sera poursuivie par les monarques suivants (Tableau 5) jusqu'au second empire avec l'Empereur Napoléon I<sup>er</sup> qui créera la grande allée des Beaux-Monts.

Tableau 5 : Attribution des routes créées en forêt de Compiègne aux différents rois de France (Buridant 2008).

Monarque	François I <sup>er</sup>	Louis XIV	Louis XV	Louis XVI
Période	1521	1643-1715	1715-1774	1774-1792
Routes	8	54	18	11

C'est également sous le règne de Louis XIV que fut installée en forêt la première faisanderie destinée à fournir du gibier pour la chasse. Jusqu'à la fin du siècle, six autres parquets à faisans prendront place en forêt sous l'impulsion de Louis XV.

Au XVII<sup>ème</sup> siècle, il apparaît dans les registres forestiers que : (i) la superficie du massif s'élève à 14 000 ha, (ii) la dominance du hêtre est manifeste sur les zones calcaires et limoneuses (favorisée par le gibier) et que (iii) les chênes dominent les parties sableuses. L'ensemble de la forêt est alors traité en futaie régulière, traitement qui a perduré jusqu'à nos jours et la surface mise en coupe annuellement est de 49.6 ha. Cette surface d'équilibre qui vient du XVI<sup>ème</sup> siècle est progressivement augmentée au début du XVII<sup>ème</sup> avec l'autorisation d'exploitation des vieilles futaies et des futaies dégradées. A la fin du XVII<sup>ème</sup>, la surface d'équilibre est ajustée à 52 ha de futaie, 36 ha de taillis et 27 ha d'aulnaie. Les vides représentent alors près d'un quart de la forêt et sont déclarés sous la forme de zones marécageuses ou de landes à bruyères. L'origine de ces landes est associée soit à des peuplements ruinés par un pâturage trop intensif, « Bois abrouti, bois perdu »<sup>23</sup>, ou soit à des conditions stationnelles trop acides.

La politique sylvicole commence à prendre le dessus sur la cynégétique à partir du XVIII<sup>ème</sup> siècle en raison de la forte dégradation du massif engendrée par les surpopulations de gibiers. Le privilège de la chasse étant réservé au roi et à sa cour, les effectifs de cerfs, de chevreuils et de sangliers ont rapidement dépassé la capacité d'accueil de la forêt. Sur la période 1743 – 1787, les registres de la chasse royale font état des prélèvements annuels suivants : 10 à 15 cerfs et 30 sangliers, ce qui constitue un nombre d'animaux abattus clairement insuffisant pour respecter un équilibre sylvo-cynégétique. Les dégâts des lapins sont d'ailleurs indiqués par les forestiers ainsi que les riverains de la forêt, ces lagomorphes engendrant des dommages importants sur les terres des paroisses voisines de Compiègne. De plus, la technique de l'acheminement du bois par flottage rendu possible par la

<sup>22</sup> Buridant 2008

<sup>23</sup> Parole de Monsieur Mennechet, procureur national de la maîtrise de Laon, 1794.

confluence de l’Aisne et de l’Oise, est introduit dans le nord de la France au XVIII<sup>ème</sup>. La forêt de Compiègne est donc de plus en plus appelée à expédier sa production vers Paris ce qui maintient une directive sylvicole dans la gestion du domaine. Vers la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, Compiègne exporte annuellement vers la capitale environ 29 000 stères, sans compter les coupes extraordinaires qui pouvaient être demandées.

Jusqu’au XIX<sup>ème</sup> siècle, le massif de Compiègne va faire l’objet de grands travaux d’aménagements et de reconstructions. La surface de production forestière va augmenter dans ce laps de temps de 6 500 ha par voie de régénération naturelle (recépage des futaies dégradées, exploitation anticipée) et artificielle dans les zones de vides, dégradées et périphériques à la forêt. Les essences plantées sont : les chênes, les ormes, le frêne, le châtaignier et subsidiairement le hêtre. Le pin sylvestre est également introduit dans les zones sableuses.

Ce comblement des vides va se faire progressivement au fil de cinq dates clefs :

- 1700 : le bilan dressé des vides est de 1552 ha et la technique envisagée pour réintroduire la forêt est la dispersion de graines forestières (glands de chêne en priorité).
- 1760 : devant l’échec de la précédente tentative, une action plus drastique est mise en place avec un labour du sol avant plantation de jeunes plants ainsi qu’une protection contre les gibiers (enceinte en bois). Cet essai est conduit sur 155 ha.
- 1772 : après l’établissement d’une carte des vides, une nouvelle campagne de plantation est menée sur 310 ha jusqu’en 1792 par la famille Pannelier (du nom d’un propriétaire forestier, pépiniériste et agronome). Ce travail sera si ardu que la prestation des Pannelier passera de 200 livres/arpent à 300 livres/arpent. Un cahier des charges très précis est imposé à l’entrepreneur avec 30 articles qui doivent être scrupuleusement respectés et charge à la maîtrise forestière de suivre et de surveiller ce chantier de forte ampleur. Le tableau 6 précise quelques-uns des articles de ce cahier des charges. Les articles 15 à 30 ne portent que sur la protection des plantations (treillage chêne, taille du fil de fer, types de portes...). Un suivi de la plantation est également commandé avec un binage annuel des lignes de plantation sur 3 années. La plupart des châtaigniers plantés ont échoué dans leur reprise et seront remplacés par des chênes.

Tableau 6 : Cahier des charges des Panneliers pour le reboisement en forêt de Compiègne en 1779 (Buridant 2008).

Articles	Clauses
1	Débroussaillage, dessouchage et coupes des arbres restants (lisières, bouquets).
2	Labour sur 60 cm de profondeur (2 pieds) et les herbacées placées en fond de jauge.
4	Utilisation exclusive de plants issus de pépinières forestières.
5	Essence principale : le chêne. Comblement avec charme, orme.
6	Espacement des plants : 1.20 m x 1.20 m ou 1.50 m x 0.9 m

- 1789 : le reboisement n'est plus réservé aux vides et s'étend sur 80 ha de zones agricoles. Au final, plus de 3360 ha ont été ainsi réaffectés à la production forestière faisant, par la même occasion, du chantier de reboisement de Compiègne le plus vaste projet forestier de l'ancien régime.
- 1807 à 1871 : les plantations se poursuivent sur 3250 ha avec l'intervention de différents entrepreneurs.

L'histoire de la forêt de Compiègne est très riche et très bien documentée depuis le XVI<sup>ème</sup> siècle. Sa surface est globalement stable depuis le XVII<sup>ème</sup> siècle, comme en témoigne cet superposition de la carte d'état-major du XIX<sup>ème</sup> siècle avec la carte actuelle (Figure 24). Notre étude se propose d'en explorer les archives pédoanthracologiques et d'observer quelles sont les traces encore visibles de cette longue évolution. La connaissance de l'histoire nous évite de travailler sur des zones trop fortement perturbées telles que les anciens vides qui ont connu un véritable bouleversement au niveau pédologique du fait du travail du sol avant plantation.

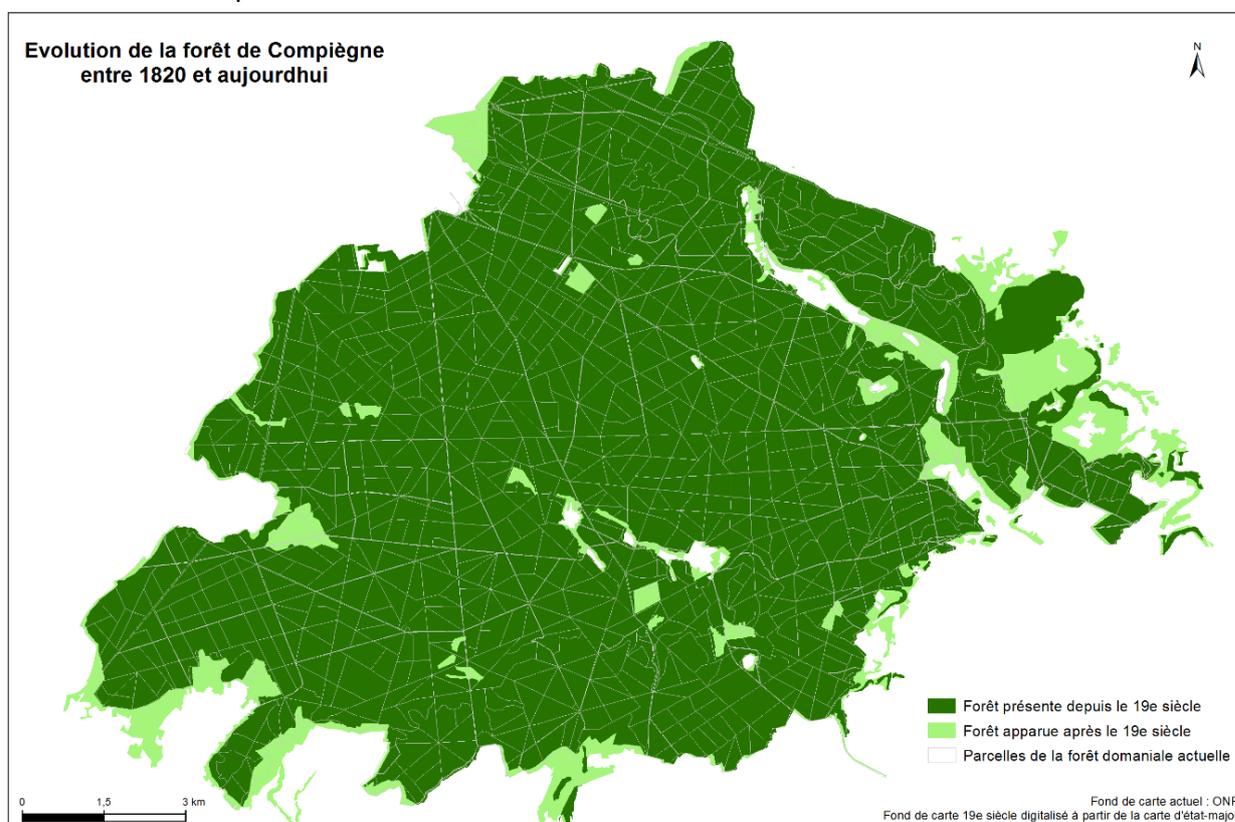


Figure 24 : Carte de l'évolution de la surface forestière de Compiègne depuis 1820.

### 3.4 Sites d'études

Les trois sites étudiés à Compiègne sont localisés à l'est et au sud-est du massif (Figure 25).

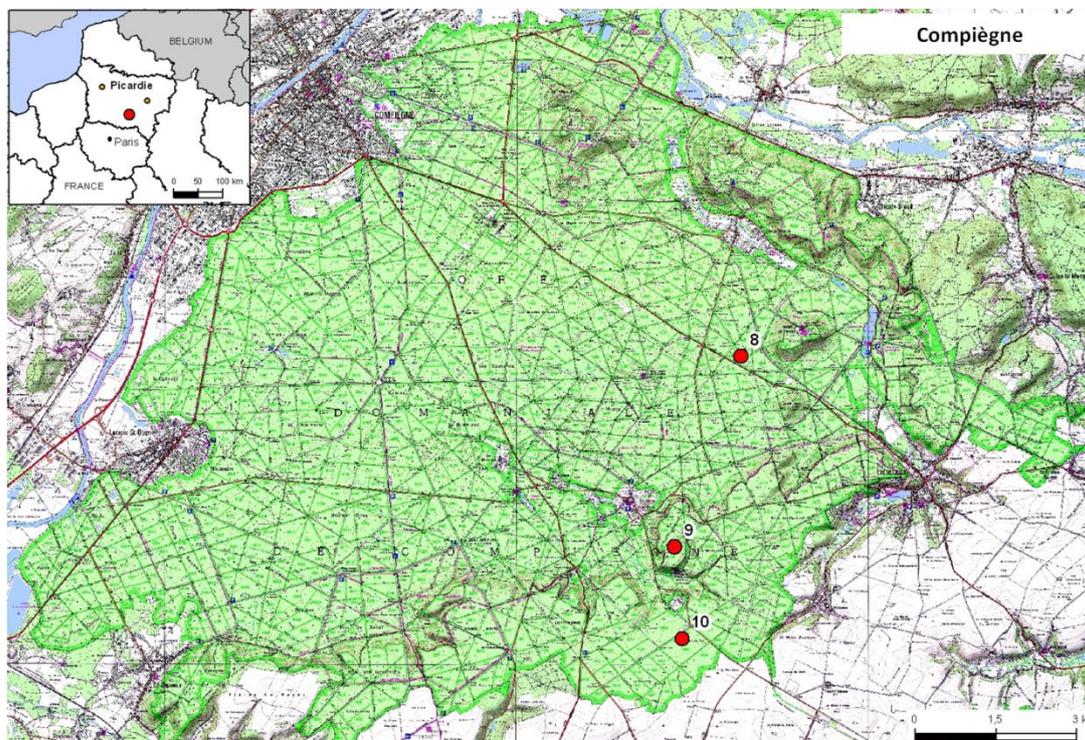


Figure 25 : Carte de localisation des sites d'études en forêt de Compiègne. (8) pour podzol, (9) pour cambisol et (10) pour luvisol.

Ces cas d'études ont été choisis en raison de leurs caractéristiques géologiques, pédologiques, topographiques et historiques. L'expertise de Roger Langhor<sup>24</sup> sera mise à contribution pour affiner la description des profils pédologiques et pour aider à comprendre leurs origines et évolutions dans le temps.

#### 3.4.1 Le podzol de Compiègne

Situé au cœur de la parcelle 3202 (Figure 25, n°8), le contexte sylvicole du site dénommé « podzol de Compiègne » se caractérise par un régime de type futaie, d'une structure régulière en gros bois (classe de diamètre > 50 cm) et d'une hauteur moyenne de 30 m. Les essences dominantes sont le hêtre à 70% (*Fagus sylvatica*) et les chênes (*Quercus robur*, *Quercus petraea*). Les espèces d'accompagnements sont, par ordre d'importance, le charme (*Carpinus betulus*), le sorbier des oiseleurs (*Sorbus aucuparia*), le houx (*Ilex aquifolium*), le cerisier tardif (*Prunus serotina*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*).

Le microrelief est globalement peu marqué à l'exception du nord et de l'est de la parcelle où se dessine très nettement un relief dunaire (datation inconnue). Le traitement des données LIDAR nous permet de visualiser ce relief ainsi que les traces des aménagements sylvicoles : voies d'accès et cloisonnements mis en place lors de la régénération artificielle en résineux au nord (Figure 26).

<sup>24</sup> Prospection en forêt de Compiègne au mois d'avril 2012.

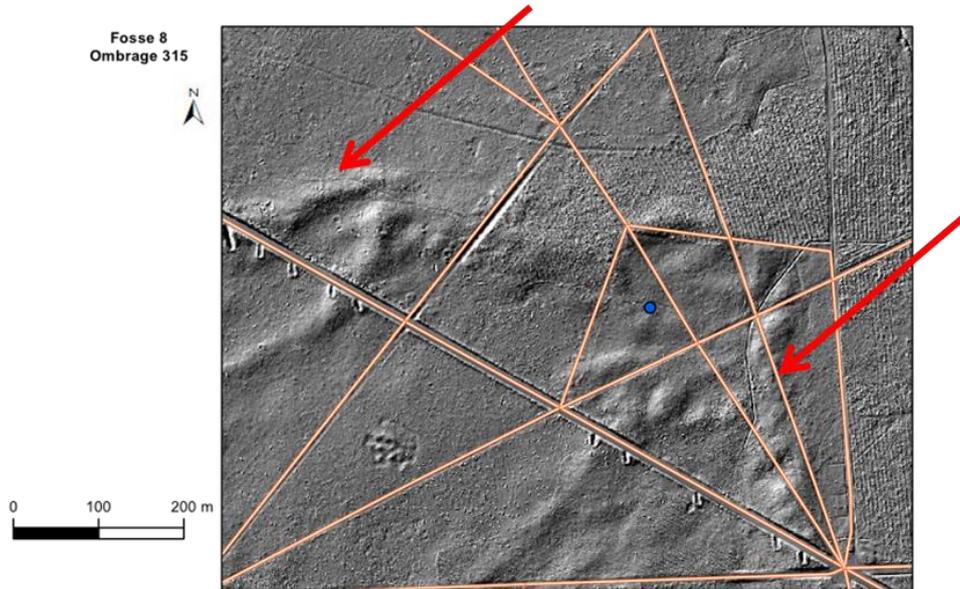


Figure 26 : Cartographie du réseau de dessertes (en orange), du microrelief et de la formation dunaire (flèches rouges) pour le podzol de Compiègne. En bleu la fosse pédologique du site.

En ce qui concerne le profil pédologique du site, dont le détail est donné en figure 29, accompagné de certaines données physico-chimiques pour les horizons (Tableau 7), nous avons un podzol humo-ferrique enterré sous une couche de sables soufflés de 30 cm d'épaisseur. L'humus est de type hemimoder et aucun turricule ou indice de perturbations actuelles des sols liés à la faune n'est décelé.

Nous avons arrêté la fosse pédologique à 140 cm mais la prospection tarière indique une couche de silex roulés à 170 cm. Un chablis de hêtre témoigne de ce niveau de silex par une racine pivot formant un coude à environ 170 cm de profondeur (Figure 27).

L'enracinement est présent en surface et diminue fortement au-dessous de 40 cm de profondeur. La texture est dominée par les sables avec des compléments de limons et d'argiles et le pH augmente en profondeur.

La structuration des horizons, Ah-Ae-Ah2-E2-Bh-Bs (Figure 29), nous permet de déduire une succession de 5 séquences pédo-historiques :

- Dépôt de sables éoliens au Pléniglaciaire.
- Développement d'un sol bariolé durant le Tardiglaciaire ou l'Holocène, avec une légère accumulation d'argile, de fer et manganèse en profondeur.
- Podzolisation de type « podzol ferrique » indiquant une végétation forestière.
- Changement d'usages avec présence de pâturages, visibles de par une forte abondance d'anciennes galeries de carabidés de type bousiers autour de l'horizon Ah2. Cela indique une présence importante d'herbivores dans le passé, ces insectes se nourrissant des fèces de mammifères. Ce changement d'usage peut être la cause d'une érosion locale, à l'origine des zones d'accumulations de sables soufflés (Figure 28). Dans le même temps, nous assistons à un développement du podzol humo-ferrique avec formation et accumulation organo-ferriques dans les horizons Bs et Bh.
- Retour à une ambiance forestière avec des enracinements profonds, jusqu'au niveau calcaire, utilisant les anciennes galeries du développement forestier passé.

Cette évolution donne lieu à ce profil aux horizons très différenciés qui a probablement conservé une trace de ces évènements dans ses archives anthracologiques.



Figure 27 : Chablis de hêtre en parcelle 3202 et preuve du plancher de silex à 170 cm de profondeur par la racine pivot en angle droit (flèche rouge).

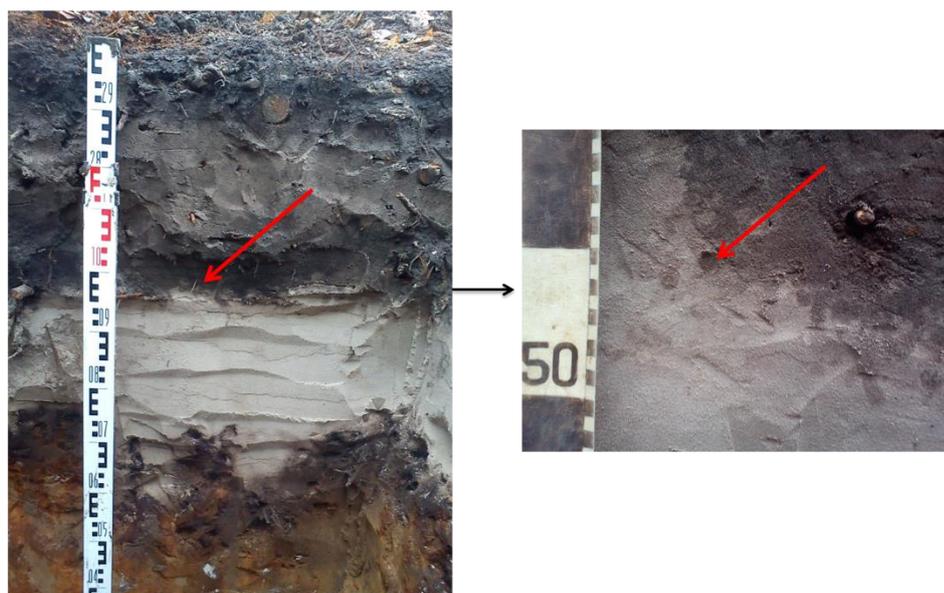
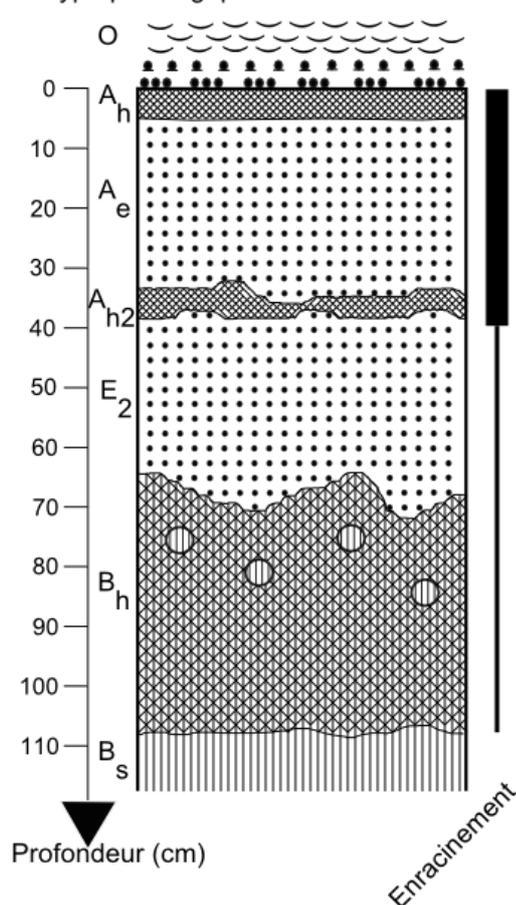


Figure 28 : Profil pédologique du podzol de Compiègne et zoom sur l'horizon Ah2 enterré et les galeries de bousiers indiqués par les flèches rouges.

Code site : FDCsite8  
 Altitude : 70m  
 Topographie : Plateau  
 Substrat : Sableux  
 Végétation : Chênaie-hêtraie  
 Date de l'observation : 24.04.2012  
 Type pédologique : Podzols

### Description morphologique



# Humus de type Hemimoder

# 0-5cm : horizon à structure particulaire, texture sablo-limoneuse, couleur sombre (10YR2-1). Enracinement fin et gros, abondant.

# 5-32cm : horizon à structure particulaire, texture sableuse, couleur gris-brun (10YR5-1). Même type d'enracinement.

# 32-39cm : ancien horizon de surface (A1), enterré suite à un épisode de sable soufflé. Texture sableuse, couleur sombre (10YR2-1). Même type d'enracinement.

# 39-66cm : horizon d'éluviation, de couleur claire (10YR7-1), texture sableuse, structure particulaire. Enracinement gros et rare.

# 66-109cm : horizon d'accumulation de matière organique, de structure particulaire et de texture sableuse. Couleur sombre (5YR2.5-2). Enracinement rare. Fortement induré. Présence de concrétions ferro-manganiques.

# 109-160cm : horizon d'accumulation de fer. Couleur rouille (10YR6-6) à structure compacte et texture sableuse. L'enracinement est absent.

Figure 29 : Profil pédologique du podzol de Compiègne.

Tableau 7 : Caractérisation physico-chimique des horizons du podzol de Compiègne.

Profondeur (cm)	Couleur (sol humide)	pH H <sub>2</sub> O	EG %	Racines %	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)	
Ah	0-5	10 YR 2/1	3.79	0	60	2.59	3.71	9.79	55.86	28.05
Ae	5-32	10 YR 5/1	4.33	0	55	4.37	6.79	15.41	51.86	21.57
Ah2	32-39	10 YR 2/1	3.98	0	60	2.06	3.73	7.76	48.27	38.19
E2	39-66	10 YR 7/1	4.88	0	5	1.29	1.24	1.48	47.15	48.84
Bh	66-109	5 YR 2.5/2	4.57	0	5	1.84	1.99	2.18	52.81	41.18
Bs	109-160	10 YR 6/6	5.04	0	0	3.46	2.87	2.67	52.60	38.41

### 3.4.2 Le cambisol de Compiègne

Le site « cambisol de Compiègne » est localisé sur un plateau dans la parcelle 6301 (Figure 25, n°8), décrite comme une futaie régulière de bois moyens (classe de diamètre 30-45 cm), de 20 m de hauteur moyenne. Le peuplement est une hêtraie monospécifique (90 %) avec un accompagnement de charme (*Carpinus betulus*) et de frêne (*Fraxinus excelsior*) absent de la strate dominante. Le lierre (*Hedera helix*) est la dernière essence ligneuse du site. De nombreux indices ou restes d'anciens chablis sont présents, l'exposition au vent dominant d'ouest en étant sans doute la cause. L'observation de turricules est notée mais pas de traces de taupes ou autres mammifères forestiers.

Le relief est nul pour la parcelle mais devient très fort avec les ruptures de pentes qui bordent le plateau (Figure 31). Le LIDAR ne révèle pas de structures archéologiques ou historiques sur ce site.

Au niveau du profil pédologique (Figures 30 et 32), nous sommes en présence d'un cambisol, aux horizons Ah-(B)-Bt-C. La profondeur de la fosse, définie ici par la roche mère, est de 65 cm. L'humus est de type oligomull, l'enracinement est très important sur l'ensemble du profil et des blocs de calcaire se retrouvent à différentes hauteurs de sol, parfois même en affleurements. Les analyses physico-chimiques (Tableau 8) révèlent que du sable est présent en abondance sur l'ensemble du profil et que le pH varie peu selon la profondeur.



Figure 30 : Illustration du profil de sol du cambisol de Compiègne.

Trois éléments ressortent de l'analyse du sol :

- La richesse en argile indique que l'altération de la roche mère précède probablement le dernier âge glaciaire.
- Le sable présent dans la texture des horizons provient certainement de dépôts éoliens.
- Une variabilité de la hauteur de la roche mère et des blocs calcaires est notée indiquant une irrégularité dans la dureté de la roche et favorisant un certain sens d'écoulement de l'eau (processus de Karst).

Ce second profil pour Compiègne se différencie par sa profondeur, sa richesse minérale induisant une plus grande vie dans le sol, et une nature carbonatée qui favorise la diversité végétale.



Figure 31 : Localisation de la parcelle 6301.

Code site : FDCsite9  
 Altitude : 125m  
 Topographie : Début de pente  
 Substrat : Calcaire  
 Végétation : Hêtraie  
 Date de l'observation : 25.04.2012  
 Type pédologique : Cambisols

### Description morphologique

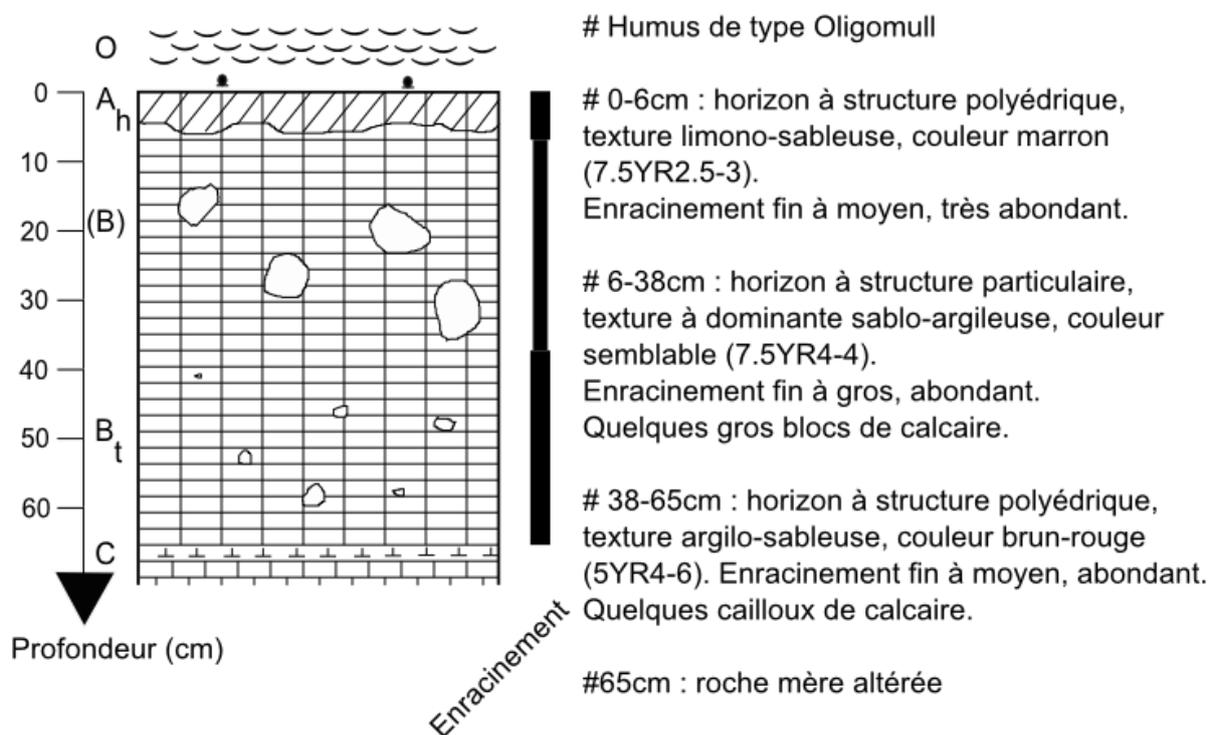


Figure 32 : Profil pédologique du cambisol de Compiègne.

Tableau 8 : Caractérisation physico-chimique du cambisol de Compiègne.

Profondeur (cm)	Couleur (sol humide)	pH H <sub>2</sub> O	EG %	Racines %	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)
Ah 0-6	7.5 YR 2.5/3	4.49	0	65	9.19	12.67	19.70	44.11	14.33
(B) 6-38	7.5 YR 4/4	5.05	10	40	11.53	9.06	11.07	51.36	16.98
Bt 38-65	5 YR 4/6	6.05	5	60	15.92	9.99	12.62	45.84	15.64
C 65	-	-	-	-	-	-	-	-	-

### 3.4.1 Le luvisol de Compiègne

C'est en parcelle 7490 (Figure 25, n°7), proche de la limite forestière, que se trouve le luvisol de Compiègne. Le peuplement forestier est aménagé en futaie régulière structurée en gros bois (diamètre > 70 cm). Les essences objectives pour le gestionnaire sont le hêtre (*Fagus sylvatica*) présent à 70% et le charme (*Carpinus betulus*) en sous-étage. D'autres espèces sont présentes en accompagnement : l'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus*) et le merisier (*Prunus avium*). Les autres ligneux de la parcelle étant le houx (*Ilex aquifolium*) et le fragon (*Ruscus aculeatus*).

Le sol rencontré est un luvisol (Figure 33), évoluant en condition de plateau et sur une profondeur de 250 cm. Au-delà, les limons calcaires commencent à apparaître. La prospection du site a mis au jour quelques traces d'anciens chablis, mais aucune d'une activité de la pédo-faune. Les turricules sont peu présents sous l'humus de type oligomull. Le profil est établi sur 110 cm (Figure 34). L'enracinement est fort en surface puis diminue rapidement dès 15 cm de profondeur. La structuration des horizons est Ah-Ae-B-Bt avec un C à 250 cm. Le limon grossier domine la texture avec du sable fin en accompagnement et de l'argile. Le pH est stable sur le profil (Tableau 9).

La description morphologique de ce luvisol amène aux conclusions suivantes :

- Un dépôt de limon Loessique date de la fin de la dernière glaciation.
- La décarbonatation a atteint les 250 cm, ce qui indique une continuité dans le processus depuis le début de l'Holocène, au vu des précipitations moyennes annuelles.
- L'absence de microrelief et la présence d'anciennes galeries de taupes et de lombrics dans le profil révèlent une phase de culture ou de pâturages par le passé.

Ce dernier profil est donc particulièrement intéressant de par la présence de structures agraires antiques et de par les traces pédologiques d'usages anciens des sols.



Figure 33 : Illustration du profil de sol du luvisol de Compiègne.

Code site : FDCsite10  
 Altitude : 142m  
 Topographie : Plateau  
 Substrat : Limon calcaire  
 Végétation : Hêtraie-charmaie  
 Date de l'observation : 25.04.2012  
 Type pédologique : Luvisols

### Description morphologique

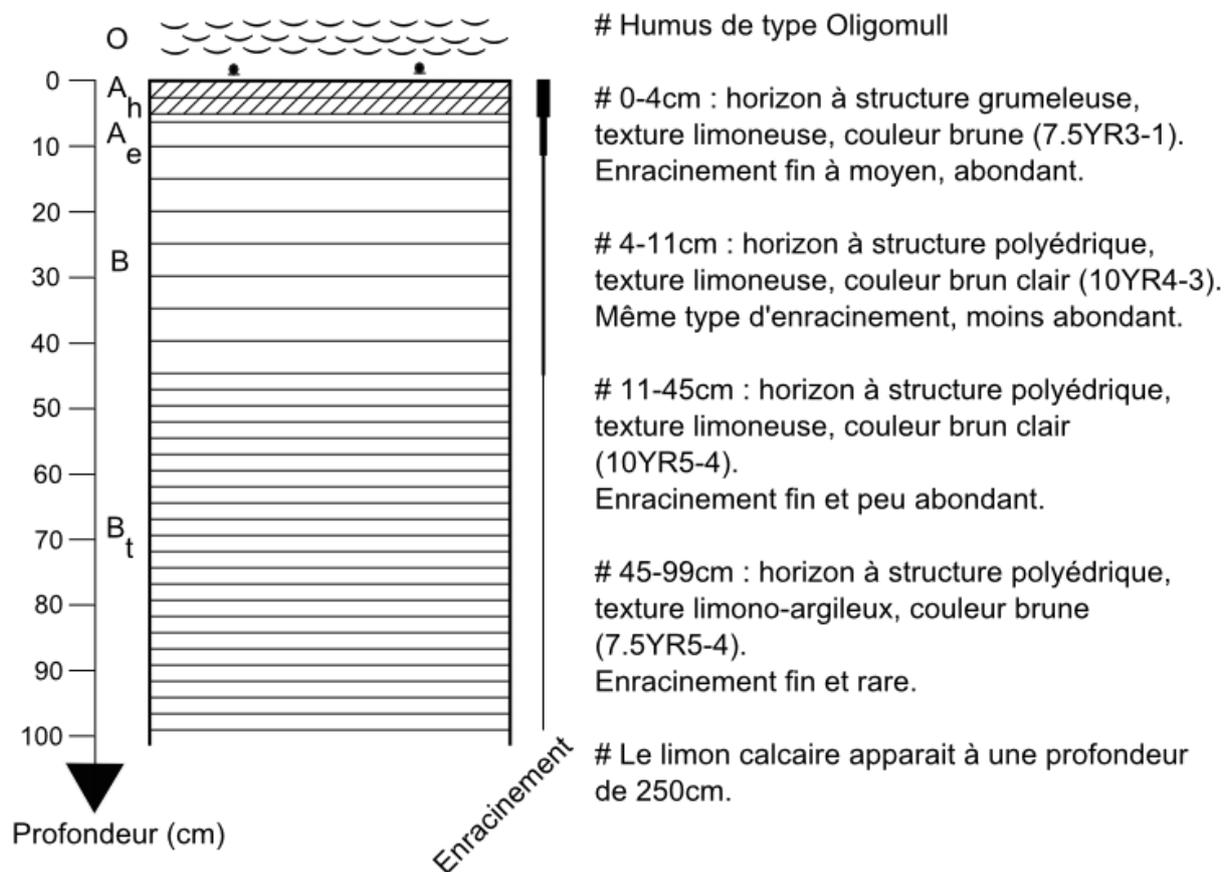


Figure 34 : Profil pédologique du luvisol de Compiègne.

Tableau 9 : Caractérisation physico-chimique du luvisol de Compiègne.

Profondeur (cm)	Couleur (sol humide)	pH H <sub>2</sub> O	EG %	Racines %	A (%)	LF (%)	LG (%)	Sf (%)	SG (%)	
Ah 0-4	7.5 3/1	YR	4.62	0	75	15.19	19.56	40.12	25.11	0.02
Ae 4-11	10 4/3	YR	4.67	0	45	17.35	18.50	39.39	23.40	1.36
B 11-45	10 5/4	YR	4.88	0	20	19.65	16.47	42.33	20.98	0.58
Bt 45-99	7.5 5/4	YR	5.35	0	5	17.16	14.02	40.66	23.50	4.67

## 4. Références

- Barthélémy, L. (1970). Recherches biogéographiques dans le Laonnois. Esquisse d'histoire de la végétation. Mémoire de Maîtrise. Université Paris X Nanterre, Paris.
- Bocquillon, A.M. (2000). Le roi dans ses forêts de Cuise, Laigue, Retz du XIIIe au XVe siècle. Thèse de Doctorat. Université de Paris I Panthéon – Sorbonne, Paris.
- Bournerias, M., Arnal, G., Bock, C. (2001). Guide des groupements végétaux de la région parisienne. Belin, Paris.
- Buridant, J. (2008). Le premier choc énergétique : la crise forestière dans le nord du Bassin Parisien, début XVIIIe – début XIXe siècle. Mémoire HDR. Université de Paris IV – Sorbonne, Paris.
- Buridant, J. (1999). Les Espaces forestiers Laonnois (début XVIIe – début XIXe siècle), hommes, environnements et paysages à l'époque pré-industrielle. Thèse de Doctorat. Université de Paris IV – Sorbonne, Paris.
- Doyen, B., Decocq, G. & Thuillier, P. (2004). Archéologie des milieux boisés en Picardie. *Revue archéologique de Picardie*, **1**, 149–164.
- Duchaufour, P. (2001). Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement. Dunod, Paris.
- Fémolant, J.M. & Malrain, F. (1996). Les établissements ruraux du deuxième Âge du Fer et leur romanisation dans le département de l'Oise. *Revue archéologique de Picardie. Numéro spécial*, **11**, 39–53.
- Gerard, J.F., Teillaud, P., Spitz, F., Mauget, R. & Campan, R. (1991). Le sanglier. ' *Les Ongulés sauvages de France. Bilan des recherches récentes*', sous la direction de R. CAMPAN, R. BON, et V. BARRE.
- Jakubowski, J.F. (1997). La verrerie de la fosse 3162 du site des Hallettes à Compiègne (Oise). *Revue archéologique de Picardie. Numéro spécial*, **13**, 263–269.
- Malrain, F., Gaudefroy, S. & Gransar, F. (2005). La Protohistoire récente : IIIe siècle - Ière moitié du premier siècle avant notre ère. *Revue archéologique de Picardie*, **3**, 127–167.
- Office National des Forêts (2007). Schéma Régionale d'Aménagement de Picardie. Direction Territoriale Ile-De-France – Nord-Ouest, Paris.
- Office National des Forêts (2006). Directive Régionale d'Aménagement – Picardie. Direction Territoriale Ile-De-France – Nord-Ouest, Paris.
- Pernaud, J.M. (1997). Paléoenvironnements végétaux et sociétés à l'Holocène dans le nord du Bassin Parisien. Thèse de Doctorat. Université de Paris I Panthéon – Sorbonne, Paris.
- Sautai-Dossin, A.V. (1973). Premières recherches sur les verreries en forêt de Compiègne. *Revue archéologique de l'Oise*, **4**, 59–65.
- Teillaud, P., Bon, R., Gonzalez, G., Schaal, A., Ballon, P. & Campan, R. (1991). Le cerf. ' *Les Ongulés sauvages de France. Bilan des recherches récentes*', sous la direction de R. CAMPAN, R. BON, et V. BARRE.

## Chapitre III : Pédoanthracologie : une approche méthodologique et statistique.

---

Ce chapitre est constitué de l'article « *Influence of site history, soil type and sampling design in soil charcoal analyses. Sampling strategy for soil charcoal analysis.* » soumis à la revue *Archaeobotany and Vegetation History*, ainsi que d'éléments de discussion supplémentaires non publiés. Son objectif est de répondre aux défis méthodologiques et statistiques de l'étude des charbons de bois.

La pédoanthracologie est une discipline jeune, apparue internationalement en 1996, et par conséquent encore en construction. Cependant, de par ses nombreuses applications en paléo-écologie depuis 20 ans, certains questionnements sont apparus. Ces défis concernent la validité scientifique de la méthode et son usage dans d'autres disciplines telle que l'écologie historique par exemple. Des réponses méthodologiques et taphonomiques sont à apporter concernant i) la représentativité de la biocénose brûlée par rapport à l'écosystème initial, ii) la représentativité de l'anthracocénose en lien avec cette végétation ligneuse carbonisée et enfin iii) la représentativité de l'échantillonnage pédoanthracologique par rapport à l'anthracocénose totale du sol. Sur ce dernier aspect, plusieurs auteurs ont prouvé que les résultats pédoanthracologiques varient entre fosses voisines pour un même site d'étude. Le projet de mesurer et décrire cette hétérogénéité spatiale par une approche statistique n'a jamais été mené à bien jusqu'à nos travaux de recherche. L'enjeu est de déterminer si la distribution spatiale des charbons et des taxons correspond à un pattern spatial ou non.

Une reconstitution valable de la composition d'un peuplement forestier passé doit s'appuyer sur la représentativité et sur une stratégie de prélèvement optimale.

### **1. La variabilité spatiale des données anthracologiques est-elle prévisible ou aléatoire ?**

Les différentes expériences exposées dans l'état de l'art ont démontré une forte variation dans l'espace, en masse et en espèces, de l'anthracocénose. Avec les outils de la statistique spatiale, nous allons tenter de mesurer cette hétérogénéité spatiale et de donner une échelle de prédiction pour des résultats pédoanthracologiques, échelle qui pourrait être de quelques centimètres, mètres ou décamètres.

## **2. Existe-t-il une stratégie d'échantillonnage optimale pour mener une étude des charbons du sol ?**

Pour mesurer la variabilité spatiale nous avons mis en concurrence deux types d'échantillonnages : l'approche tarière afin de prélever les échantillons sur un maillage précis et l'approche par fosse pédologique, réalisée au centre des maillages tarières. L'enjeu est de tester l'efficacité ou la représentativité de l'anthracocénose de ces deux méthodes, voire leur complémentarité.

## **3. Peut-on déterminer un effort minimal d'échantillonnage afin d'être représentatif de l'anthracocénose du sol ?**

Comme vu dans l'état de l'art, il existe différents protocoles chacun proposant un effort d'échantillonnage spécifique relatif aux quantités de sol à prélever et aux effectifs de charbons à identifier. L'objectif est de déterminer à partir de quel seuil un effort, en nombre de litre ou de charbons, est viable statistiquement. Le temps de travail pour l'extraction et l'identification microscopique des charbons étant considérable, un effort juste et représentatif peut permettre de gagner en efficacité.

## **4. Peut-on établir un protocole standardisé en pédoanthracologie ?**

Puisque le type de station conditionne le cortège floristique et la vulnérabilité aux incendies, l'effort d'échantillonnage est-il impacté par la nature pédologique d'un terrain d'étude ? En est-il de même avec l'influence historique des 2 derniers millénaires ? Si le protocole ne peut pas être standardisé, il faudra adapter l'effort d'échantillonnage à chaque cas d'étude.

# 1 Influence of site history, soil type and sampling design in soil charcoal analyses. Sampling strategy for soil charcoal analysis.

**Thomas Feiss<sup>1</sup>, Hélène Horen<sup>1</sup>, Boris Brasseur<sup>1</sup>, Jonathan Lenoir<sup>1</sup>, Jérôme Buridant<sup>1</sup> and Guillaume Decocq<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup>Ecologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés (EDYSAN, FRE 3498 CNRS-UPJV), Université de Picardie Jules Verne, 1 rue des Louvels, F-80037 Amiens Cedex 1, France.

## 1.1 Abstract

Soil charcoal analysis is of particular interest to reconstruct and interpret past forest landscapes. However, how far soil charcoal spectra are representative of past forest communities remains unclear. Here we sampled three types of soils from two ancient forests of north France, using a single 1.5 x 1.5 m pit *versus* several auger cores regularly distributed over a 1000 m<sup>2</sup> area. Soil charcoals were extracted to compute specific anthracomasses (SA) and, for one of the sites, to determine taxonomic composition. We analysed SA spatial autocorrelation using the Moran's I index and taxonomic richness using additive partitioning of rarefaction curves.

Except in the upper horizons of the pits, SA showed no spatial structure as a plausible effect of soil disturbance and biological activity. Taxonomic richness increased faster with the auger sampling method. The pit technique retrieved more species, but the sampling effort was still insufficient to be representative and has to be adapted according to the horizon depth. With the auger sampling method, a minimal number of 500 to 750 charcoals was required to reach a full picture of the soil charcoal assemblage, corresponding to a mean volume of 24 to 40 L of sampled soil, depending on soil type. Historical land use and site management, together with the type of soil, should be taken into account when designing a sampling strategy of soil charcoals. The sampling design and effort should be adapted to the goal of the study, the biological activity of soils and the expected density of charcoals.

**Keywords:** Anthracology, rarefaction curve, sampling effort, spatial autocorrelation, forest, additive partitioning of diversity.

## 1.2 Introduction

Soil charcoal analysis or pedoanthracology addresses ecosystems that have supported, at least temporarily, woody plants. It allows the reconstruction of past fire events and the identification of the associated burnt woody material (Carcaillet 1998; Gavin 2003). During a fire, charred plant material accumulates over the soil surface, is then fragmented with time, buried and preserved over millennia since very resistant to oxidation and microbial decomposition (Carcaillet and Talon 1996; but see Ohlson et al. 2009). It can be found in almost all types of soil and sediments worldwide, hence is a ubiquitous proxy in past environment studies (Ritchie 1995). Soil charcoal studies have been applied to a wide range of research challenges in ecology such as, for example: (i) reconstructing changes in the distribution area of tree species (e.g. Carcaillet et al. 1997) and shifts of tree lines (e.g. Cunill et al. 2012) and paleoclimates (e.g. Bush et al. 2008); (ii) measuring soil carbon pools (e.g. Ohlson et al. 2009); (iii) investigating local fire history (e.g. Payette et al. 2012); (iv) inferring past vegetation composition (e.g. Robin et al. 2014), former land uses (e.g. Bal et al. 2010), vegetation dynamics (e.g. Poschlod and Baumann 2010) and the spread of agriculture (e.g. Robin et al. 2014); (v) retrieving glacial tree refugia (e.g. Bélanger et al. 2014); and (vi) assessing the naturalness of ecosystems (e.g. Robin et al. 2013).

First proposed by Jacquot et al. (1973) and further named pedoanthracology by Thinon (1978), the approach consists in the extraction of wood charcoal fragments from soils, their quantification and taxonomic identification, usually combined with radiocarbon dating (Carcaillet and Thinon 1996; Talon et al. 1998). The rationale behind pedoanthracology is that the soil charcoal signal reflects the composition of past plant communities that have established locally. Carcaillet (2001) demonstrated a lack of relationship between the depth of the buried wood charcoal and their age, indicating no stratification as a plausible consequence of bioturbation by the soil fauna, hence that pedoanthracological studies can hardly resolve the temporal sequence of vegetation changes. But whether the soil charcoal picture is representative of the burned woody community composition has surprisingly received little attention (but see Bégin and Marguerie 2002).

Classically, wood charcoal fragments are extracted from soil samples that are taken from different soil horizons or soil depth levels (usually every 5-15 cm) in a soil pit, from the bedrock at the bottom towards the surface. The soil pit covers a few square meters (ca. 2 x 4 m in Bal et al. 2010; 1.5 x 2 m in Robin et al. 2014) and reaches a depth of 30 to 100 cm. The size of the soil sample varies with the soil type and estimated charcoal density, but most often is 10 litres or 5-15 kg per sampled level. Only the fragments above a certain threshold size are taxonomically identified, ranging from 0.4 mm (e.g. Carcaillet and Thinon 1996; Talon 2010) through 1 mm (e.g. Robin et al. 2013) to 1.25 mm (Touflan et al. 2010), either entirely or partly. This sampling protocol seems to become a traditional way of proceeding in pedoanthracology though its robustness has never been assessed so far. Yet wood charcoal fragments are likely to be highly spatially heterogeneous at the stand scale (Talon et al. 2005). Both patchiness of the established vegetation due to the spatial heterogeneity of environmental conditions (e.g. soil characteristics, light availability, disturbance), and the spatial heterogeneity of forest fire severity (Taylor and Skinner 2003) may contribute to this suspected heterogeneity in wood charcoal deposits. Designing a representative sampling and determining the minimal effort to reach representativeness are at the basis of any

scientifically sound field study, but this is particularly challenging below ground (Baker et al. 2009; Muukkonen et al. 2009; Plue and Hermy 2012). This is important for pedoanthracology, since the entire approach, from the field sampling to the microscopic identification of charcoal fragments, is very time-consuming. Here, we seek the potential influence of site history, soil type and sampling design on the results of soil charcoal analyses to determine an optimal sampling strategy.

More specifically, we aim at testing the following research hypotheses:

H1: Greater densities of soil charcoals are retrieved (i) where past land use involved fire inside the forest, (ii) in dry, acidic soils (i.e. podzols) because of greater flammability of natural vegetation;

H2: Soil charcoal densities are spatially autocorrelated due to heterogeneous environmental conditions and clustered deposits from burnt trees and shrubs during a forest fire;

H3: By applying a same sample size over a greater area, we predict the same species richness per sample ( $\alpha$ -diversity) but a greater total species richness ( $\gamma$ -diversity), and thus a greater species turnover among samples ( $\beta$ -diversity).

## 1.3 Material and methods

### 1.3.1 Study sites

We conducted this study in two state forests of North France, namely the Compiègne (49° 24' 54" N -2° 49' 23" E; alt: 31 m; ca. 14,000 ha) and Saint-Gobain (49° 35' 48" N -3° 22' 33" E; alt: 53 m, ca. 9000 ha) forests. The climate is sub-oceanic with mean annual temperature and annual precipitation of 10°C and 610 mm, respectively. The geological substrate mainly consists of Paleocene/Eocene sands and carbonate rocks, locally covered by quaternary loess or drift sands. For the purpose of this study, we focused on three widespread soil types: cambisols, luvisols and podzols (FAO classification), which have varying chemical and physical properties. The current vegetation is a temperate broadleaved forest dominated by common beech (*Fagus sylvatica* L.) and oaks (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Mattuschka) Lieblein). Both studied forests were formerly royal forests whose continuity is attested since the early Middle Ages (500-1000 A.C.). The Compiègne forest has been managed as high forest for royal and imperial hunting, whilst the Saint-Gobain forest has long been treated as intensive coppice-with-standards for the local glass industry and urban needs.

### 1.3.2 Soil sampling

We sampled the three types of soil in both forests. We first selected a sufficiently large area, without visible disturbance, with no major topographic variation, in a mature oak-beech forest stand. We then applied the following two sampling protocols within each selected area (Figure 35):

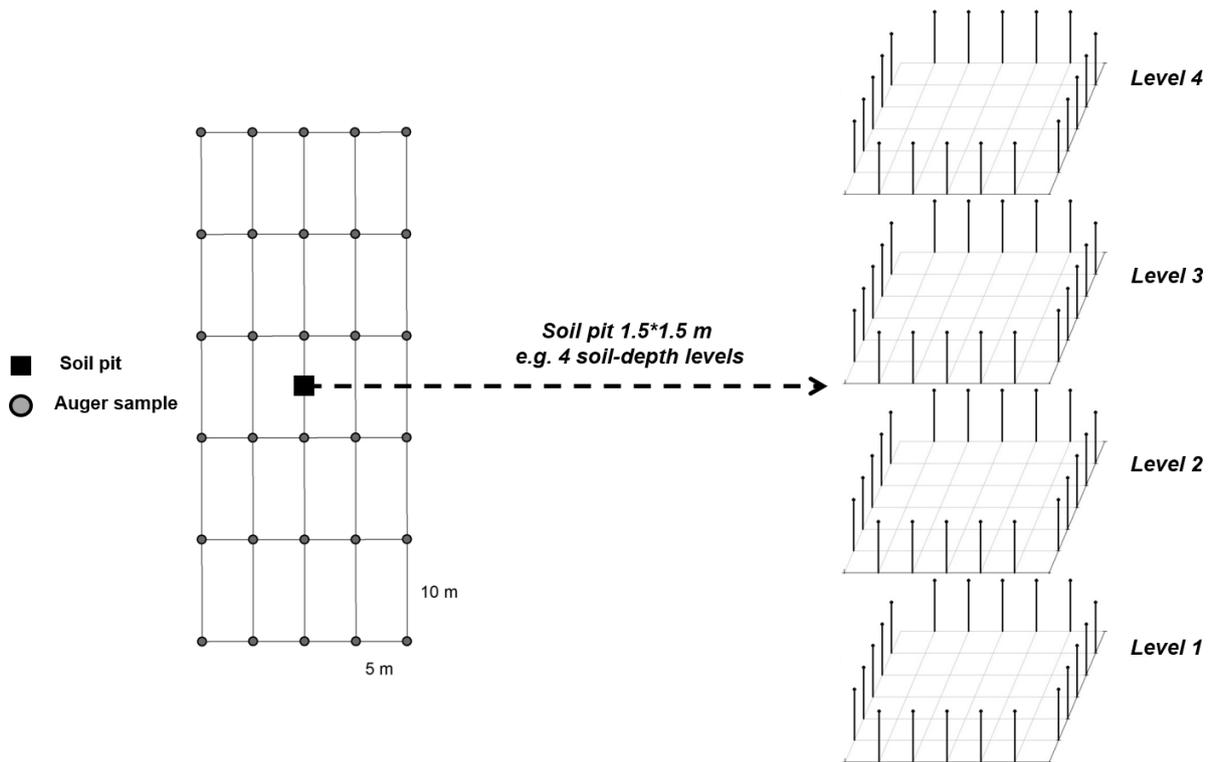


Figure 35 : Representation of the two sampling strategies.

(i) A soil pit of 1.5 x 1.5 m was randomly dug within the selected homogeneous area (hereafter: pit sampling). The pit depth depended on the bedrock depth but usually reached 1.5 m. On each side, the soil profile was described with respect of soil horizons defined by colour, depth, texture and structure, percentage and size of roots, as well as presence of stones. We subsequently sampled each recognized soil horizon, doubling our sampling effort per horizon for thicker ones: five one-litre soil samples were extracted per horizon and per side, starting from the bottom of the pit to avoid contamination (Carcaillet and Thinon 1996). Each sample was labelled according to its position.

(ii) A 1000 m<sup>2</sup> grid comprising thirty nodes was centred on the pit (hereafter: auger sampling). At each node, a one-litre core soil sample was extracted using an auger collecting the first 20 cm of the topsoil. The nodes were spaced of 5 and 10 m relative to X and Y axes, respectively (Figure 36). Each sample was labelled according to its X and Y coordinates.

### *1.3.3 Extraction and identification of charcoal*

At the lab, all soil samples were air-dried for 48h, weighed (kg) and placed in a water bath for 48h together with a defloculant agent ((NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>) and mixed into a rotary tank to break micro-aggregates. The mixed material was subsequently spread on a series of three sieves, with 3.9, 1.9 and 0.8 mm mesh sizes for manual extraction of charcoals. We deleted charcoal fragments smaller than 0.8 mm, which were too small to allow taxonomical identification. We weighed all extracted charcoals (mg) after being air-dried during 24h, as well as all stones bigger than 3.9 mm (kg). The specific anthracomass (SA; mg/kg), which reflects the soil charcoal abundance (Carcaillet and Thinon 1996; Talon 2010), was obtained by the ratio between the mass of extracted charcoals and the mass of the soil sample once elements coarser than 3.9 mm were removed.

The extraction of charcoals was done for all samples from the auger sampling, whereas for the pit sampling, we restricted the extraction to a soil volume adjusted to the observation of charcoal abundance: 20 L per horizon for the cambisol and podzol of Compiègne which were the soils with the lowest amount of charcoals; 12 to 13 L for the luvisols of Compiègne and Saint-Gobain (3 L per side); and 5 to 6 L for the cambisol and podzol of Saint-Gobain which were the soils with the greatest amount of charcoals (1 to 2 L per side).

Due to time limitation, only charcoals from the three soil types of the Compiègne forest were taxonomically identified. The taxonomic identification of charcoals was based on the wood anatomical features and carried out using: (i) a reflected light microscope (100×, 200×, 500×) (Leica® dm 2500); (ii) wood anatomical atlases (Schweingruber 1990a, b); and (iii) a reference collection of carbonized wood from the lab. The transverse, radial and tangential anatomic planes of each charcoal were observed to identify charcoals at the finest taxonomic level as possible (usually species or genus). Each charcoal was subsequently weighed to calculate the specific anthracomass per taxon (SAT; mg/kg).

### *1.3.4 Data analysis*

#### **Effect of site, soil type and sampling method.**

Due to the highly variable number of charcoals retrieved among samples, we expressed all results as medians  $\pm$  standard errors. We tested the effect of site (Compiègne vs. Saint-Gobain) and method (auger vs. soil pit) on SA values using a Wilcoxon non-parametric test, and the effect of soil type and soil level (for pits only) on SA values, using a Kruskal-Wallis test, followed by a Nemenyi post-hoc test whenever significant (H1).

#### **Spatial autocorrelation.**

To test whether SA were spatially structured (H2), we examined their respective spatial autocorrelation signals by using correlograms of the Moran's I index against distance classes. Moran's I ranges between -1 (negative spatial autocorrelation signal) and +1 (positive spatial autocorrelation signal), and equals zero when there is no spatial autocorrelation signal. We used the "correlog" function from the "ncf" package (Björnstad 2013) in R (R Development Core Team 2015) with 1000 permutations and applied the Holm correction for multiple comparisons (Holm 1979). Spatial autocorrelation was examined over the 2.25 and 1000 m<sup>2</sup> area with a minimum distance of 0.35 and 5.1 m between two samples, for the pit (each soil horizon separately) and auger sampling, respectively.

#### **Additive partitioning of rarefaction curves.**

To estimate how far the taxonomic richness and composition from soil charcoals were affected by the sampling design and effort (H3), we conducted an additive partitioning of species rarefaction curves (Clarke et al. 2011) using the "iNEXT" function from the iNEXT package (Hsieh et al. 2014) in R (R Development Core Team 2013), with 500 replications. The extrapolation curves were produced using the double reference sample size to estimate the asymptote. We built two types of rarefaction curves, for each soil horizon separately (pit sampling) and for all auger samples (auger sampling), by plotting taxon richness: (i) against

the cumulative number of identified charcoals (individual-based rarefaction curve); and (ii) against the cumulated number of soil litres (sample-based rarefaction curve). The first approach aims at determining the minimal number of identified charcoal fragments (“individuals”) to get a representative picture of the assemblage, whilst the second one aims at determining the adequate volume of soil to sample in the field (“samples”). To test whether rarefaction curves significantly differed, we computed 95% confidence intervals using a bootstrap method (Chao et al. 2014) and the “iNEXT” function. Finally, we used a log-log scale to extract the slope ( $a$ ) and intercept ( $b$ ) parameters of each rarefaction curve. Stand taxonomic richness ( $\alpha$ -diversity) was determined as the average number of taxa for a sampling effort of 10 charcoals. Total taxonomic richness ( $\gamma$ -diversity) was given by the asymptote of the rarefaction curve. Taxon turnover among samples ( $\beta$ -diversity) was obtained by using the additive formula, as  $\beta = \gamma - \alpha$ .

## 1.4. Results

### Effect of site, soil type and sampling method.

The site of Saint-Gobain exhibited greater SA values than Compiègne (median  $\pm$  se= 272.3  $\pm$  296.2 vs. 19.2  $\pm$  6.8 mg/kg) in a lower soil volume (174 vs. 300 L) (Wilcoxon test:  $W = 9683$ ,  $P < 10^{-15}$ ), irrespective to the sampling method considered (Tableau 10). This difference remained when a same sampling effort of 25 L was considered (random sampling without replacement): 30  $\pm$  19.3 vs. 15  $\pm$  4.9 mg/kg for Saint-Gobain and Compiègne, respectively ( $W = 200$ ,  $P = 0.03$ ).

The SA was greater in the auger than in the 0-20 cm horizon of the pit (89.5  $\pm$  336.8 vs. 40.8  $\pm$  60.8 mg/kg) ( $W = 15,397$ ,  $P = 0.03$ ), irrespective of the soil type and site. The six soil pits showed similar patterns of SA vertical distribution, with a decreasing SA as soil depth increased and the greatest SA in the three upper levels (see also Online Resource 1, Figure 37).

The podzol exhibited great values of SA (Kruskal-Wallis test:  $H = 15.4$ , d.f.= 2,  $P < 0.01$ ) but a low species richness by litre (1.4) ( $H = 18.6$ , d.f.= 2,  $P < 10^{-4}$ ), compared to cambisols (1.95) and luvisols (2.25).

We retrieved a greater number of identified charcoals in the second and third depth levels of the podzol and cambisol of Compiègne, whilst this number did not differ between the three upper levels (>50 cm) in the luvisol (Online Resource 2). There was no significant difference of taxonomic richness among the three upper levels of the cambisol and luvisol, whilst it peaked in the second and third levels of the podzol. On average, the topsoil of the pits (0-20 cm) contained one taxon more than the auger ( $W = 2950$ ,  $P < 10^{-5}$ ).

Tableau 10 : Results from the two sampling schemes per site and per soil type. The results of post hoc Nemenyi tests ( $P < 0.05$ ) are reported as exponent letters on median  $\pm$  standard error values of SA, number of identified charcoals, and species richness.

Site	Soil type	Soil pit								Auger (30 L)							
		Depth (cm)	Soil volume (L)	Median (mg/kg)	SE	of SA	SA minimal	SA maximal	Identified charcoal	Species richness	Depth (cm)	Median (mg/kg)	SE	of SA	SA minimal	SA maximal	Identified charcoal
Compiègne	Podzol	5	20	2.32 ± 15.3 <sup>ab</sup>			0	229.2	41 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	20	23.3 ± 34.6		0	822.5	569	7
		16	20	79.7 ± 15.9 <sup>a</sup>			10.8	257.9	361 <sup>b</sup>	6 <sup>b</sup>							
		37	20	84.9 ± 12.5 <sup>a</sup>			20.8	243.7	446 <sup>b</sup>	8 <sup>b</sup>							
		58	20	0 ± 1.7 <sup>b</sup>			0	32.9	5 <sup>a</sup>	2 <sup>c</sup>							
		83	20	0 ± 0			0	0	0	0							
	Cambisol	5	20	15.5 ± 5.4 <sup>a</sup>			2.9	101.5	79 <sup>ab</sup>	6 <sup>a</sup>	20	50.6 ± 15.2		0	283.3	260	8
		15	20	32.2 ± 6.8 <sup>a</sup>			7.2	117.7	132 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>							
		30	20	22.5 ± 3.4 <sup>a</sup>			7.9	57.3	151 <sup>a</sup>	9 <sup>a</sup>							
	Luvisol	5	12	39.6 ± 11.3 <sup>a</sup>			1	126.3	116 <sup>ab</sup>	7 <sup>a</sup>	20	23.1 ± 56.7		1.7	1421	632	7
		20	12	24.8 ± 19.8 <sup>a</sup>			0.5	246.1	147 <sup>ab</sup>	7 <sup>a</sup>							
		35	12	27.9 ± 5.2 <sup>a</sup>			0.9	76.5	176 <sup>a</sup>	6 <sup>a</sup>							
		50	12	4.1 ± 2.4 <sup>b</sup>			0	28.7	41 <sup>bc</sup>	7 <sup>ab</sup>							
		70	12	0 ± 0.5 <sup>b</sup>			0	4.3	4 <sup>c</sup>	2 <sup>b</sup>							
	Saint-Gobain	Podzol	5	5	2057.8 ± 310.8 <sup>ab</sup>			1314.7	2886.7	-	-	20	362.5 ± 1348.6		13.5	40189.8	-
20			4	3258.2 ± 626.7 <sup>a</sup>			1577.4	4499.1	-	-							
30			5	1267.5 ± 403.1 <sup>ab</sup>			750	2638	-	-							
50			5	475 ± 461.6 <sup>abc</sup>			139.4	2073.3	-	-							
70			6	126.2 ± 57.4 <sup>bc</sup>			0	378.9	-	-							
100			6	9.7 ± 16.7 <sup>c</sup>			0	100	-	-							
Cambisol		10	10	506.5 ± 73.6 <sup>a</sup>			412.9	1166.7	-	-	20	615.3 ± 1329.3		0	32700	-	-
		25	6	1573.3 ± 229.2 <sup>b</sup>			763.6	2262.5	-	-							
		40	5	561.5 ± 282.4 <sup>ab</sup>			175.6	1700	-	-							
Luvisol		5	12	138.3 ± 29.6 <sup>ab</sup>			37.5	319.2	-	-	20	308.3 ± 243.8		33.3	6303.3	-	-
		15	14	248.3 ± 64.9 <sup>a</sup>			56.7	838.5	-	-							
		35	12	186 ± 31.8 <sup>ab</sup>			28.6	613.3	-	-							
		57	12	33.1 ± 19.9 <sup>bc</sup>			0.7	229.3	-	-							
		85	12	2.3 ± 10.6 <sup>c</sup>			0	122.2	-	-							

### Spatial autocorrelation

Overall, we detected no spatial autocorrelation of SA when using the auger sampling method, irrespective to the site considered. For the pit sampling method, we found a trend ( $P < 0.1$ ) towards a positive spatial autocorrelation of SA for the first distance class only (35 cm), for all levels on podzol, and for the third level only (corresponding to the Bt horizon) on cambisol (Online Resource 1: Figure 38).

### Additive partitioning of rarefaction curves

The individual-based rarefaction curves and associated diversity parameters revealed contrasted patterns among the three soil types of Compiègne and the two sampling methods (Figure 36; see also Online Resource 3). The sample-based rarefaction curves returned very similar results (Online Resource 4).

For the podzol (Figure 36), taxonomic richness was greater when using the pit ( $\alpha = 2.98$ ,  $\gamma = 11$ ) than the auger ( $\alpha = 1.81$ ,  $\gamma = 7$ ) sampling method, but the species accumulation rate was slightly greater with the latter ( $\alpha = 0.35$  vs.  $0.32$ ). In the pit, taxonomic richness increased with the number of charcoals without reaching an asymptote and without significant difference among the three depth levels. Surprisingly, despite a greater sampled area ( $1000 \text{ m}^2$  vs.  $2.25 \text{ m}^2$ ), the auger sampling retrieved one taxon per litre less than the pit sampling at 0-20 cm deep ( $W = 381$ ,  $P = 0.008$ ); the extrapolation curve attained an asymptote at 900 identified charcoals.

For the cambisol (Figure 36), the taxon accumulation rate was greater with the auger than with the pit sampling ( $\alpha = 0.45$  vs.  $0.27$ ), with an almost linear increase of taxonomic richness with the cumulated number of identified charcoals. Again, the pit retrieved more taxa than the augers ( $\alpha = 4.0$ ;  $\gamma = 10$  vs.  $\alpha = 1.8$ ;  $\gamma = 8$ ), but there was no difference between the 0-16 cm pit level and the auger ( $\gamma = 8$ ) despite a greater number of taxa per litre in the pit topsoil ( $2.3$  vs.  $1.5$ ;  $W = 299$ ,  $P < 0.001$ ). The rarefaction curve tended to reach an asymptote at 350 charcoals with the pit topsoil sampling.

For the luvisol (Figure 36), an asymptote was found towards ca. 500 charcoals with auger sampling methods. The pit sampling retrieved two taxa more than the auger sampling ( $\gamma = 9$  vs.  $7$ ), even when only the 0-20 cm pit level was considered, with a slightly greater mean  $\alpha$ -diversity ( $W = 246$ ,  $P = 0.042$ ).

The minimal sampling effort varied according to the soil type and the sampling method. The auger method produced more identified charcoals per litre than the soil pit ( $5 \pm 4.1$  vs.  $3.5 \pm 0.6$ ) ( $W = 9407$ ,  $P = 0.05$ ), irrespective to the soil type.

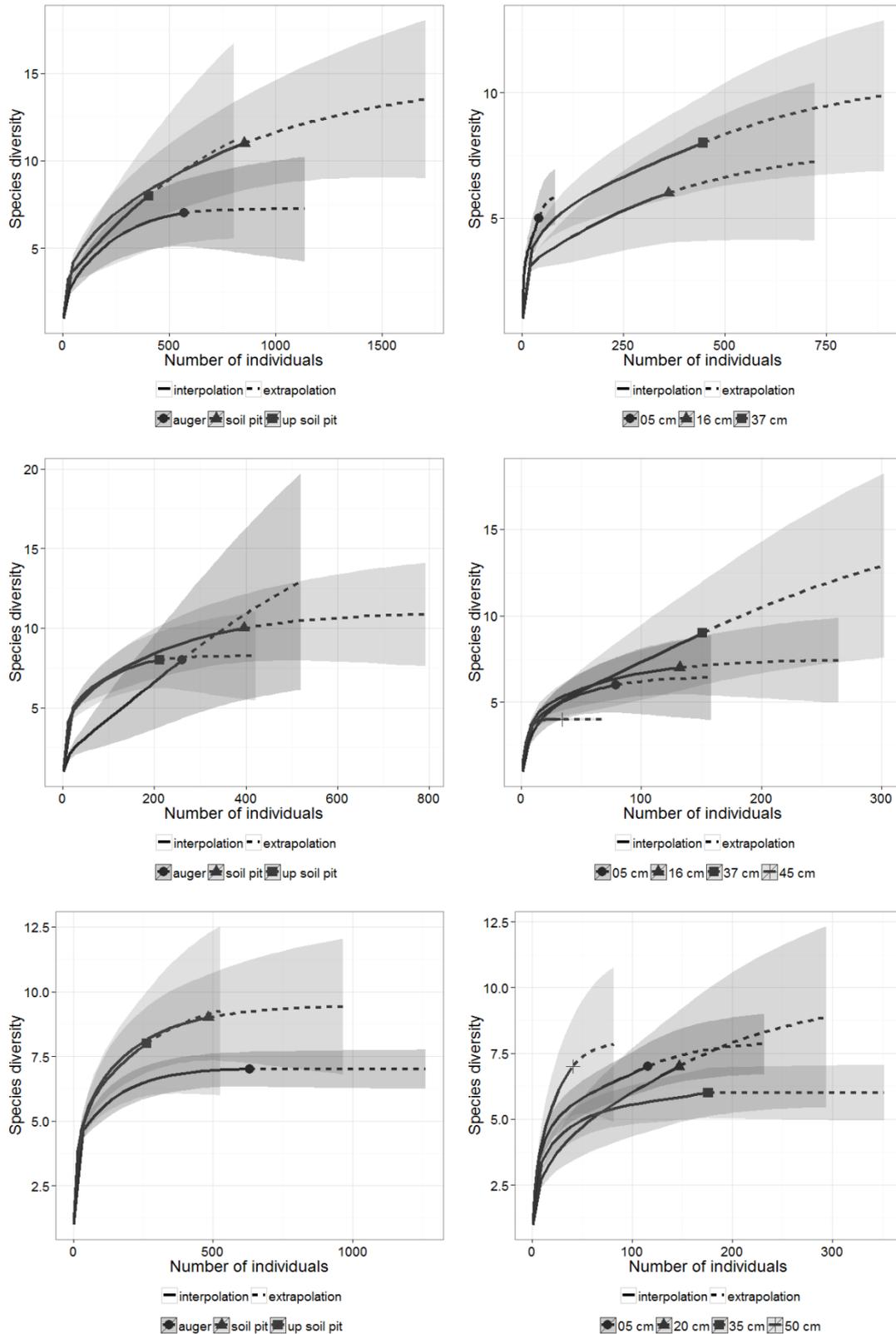


Figure 36 : Rarefaction curves with their 95% confidence interval for the different soil types (top: podzol; middle: cambisol; bottom: luvisol) of Compiègne, based on the number of identified charcoals. Left panels: comparison between the pit, auger and up-soil-pit. Right panels: soil-depth levels of the pit. Solid lines: interpolated curves; dotted lines: extrapolated curves.

## 1.5 Discussion

Our results clearly show that historical forest management and soil type should be taken into account when interpreting results from or designing a sampling strategy for soil charcoals analysis. The sampling design and effort may affect the conclusions, depending upon the expected density of charcoals in the study soil. Since this has been rarely achieved in many pedoanthracological studies found in the literature, our results cast doubt on the representativeness of some sampling designs and the derived conclusions.

### Site history matters...

We found a huge number of soil charcoals in the forest which used to be intensively managed for the industrial fuel demand (Saint-Gobain) compared to the forest managed for hunting (Compiègne). It is likely that fires were more frequent and severe in Saint Gobain, where glassmaking was particularly intensive from the 15<sup>th</sup> to the 19<sup>th</sup> century whereas Compiègne became a royal hunting reserve since the 16<sup>th</sup> century. Moreover, since wood combustibility and charcoal production by tree biomass are species-specific and depend upon the ontogenetic states of individuals (Fréjaville et al. 2013), historical management as high forest or coppicing likely impacts contemporary charcoal assemblages.

The greater SA values and identified charcoal numbers recorded into the upper layers of soil pits suggest that the soil biological activity, including plant roots and animals, led there to a concentration of charcoals (Gabet et al. 2003). Firstly, growing roots of trees and shrubs may drag down charcoals from upper horizons whereas when a tree is uprooted (e.g. following a windthrow), deep charcoals may go back up to the soil surface (Schaetzl et al. 1989; Finke et al. 2013). Secondly, activities of many belowground animal species (e.g. mammals, annelids, ants, gastropods) generate soil bioturbation and likely contribute to rearrange charcoals both horizontally and vertically (Langhor et al. 2000; Scheu 1987). This biological activity is even more important in forest soils that encountered past episodes of cultivation (Fraterrigo et al. 2006), even a long time ago (Dupouey et al. 2002). A notable consequence is the lack of correlation between this vertical distribution and the time at which fires occurred (e.g. Carcaillet 1996 and 2001; Touflan et al. 2010); charcoals collected within a same soil layer thus often come from different local fires, possibly separated by centuries (Carcaillet 1998). The lower SA in deep soil layers is a probable consequence of the lower biological activity, since few animals or roots are able to drag down the charcoals so deeply. This could also reflect lower fire severity or frequency in old times, or the lack of long-term conservation of charcoals in soils (Ohlson et al. 2009). The non-significant trend towards less charcoals in the first 5 cm of the topsoil than in the layers immediately below may be due to their burrowing by animals and plant roots, but also to the fact that forest fires, which are incompatible with the current forest management, have almost disappeared from the study sites since at least one century.

Remarkably, these vertical patterns of charcoal distribution are similar to those described in the literature, with a peak of abundance within 20-40 cm, and this despite the diversity of contexts: stubble fields in Vosges Mountain (Goepf 2007), temperate lowland forests in Germany (Robin et al. 2013), subalpine forests in the French Alps (Robin et al. 2013; Touflan et al. 2010) and the Pyrenees (Cunill et al. 2013). Only colluvial soils show more random patterns because of the erosion-deposit processes (Robin et al. 2013).

### **...and so does soil type**

Independently from site history, the soil type influences the local flammability of the forest. The soil water holding capacity and fuel moisture affect water balance and thus the fire risk (Kane et al. 2015). This is well reflected by the differences in SA among the three soil types, with the podzol exhibiting the greatest SA values. The coarse soil texture (i.e. sand) increases exposure to drought, and thus to fire frequency. In contrast, the finer texture (e.g. loess, clay) of luvisols and cambisols retains more water, making these soils less prone to fire. Moreover, the soil type strongly determines the type of vegetation it supports, which may in turn increase the risk of fire ignition. Podzols often support a mosaic of open-canopy forests and heathlands dominated by flammable chamaephytes (e.g. heathers, brooms) that are much more exposed to fire than nutrient-rich soils, such as luvisols and cambisols, which rather support closed-canopy beech-oak forests.

The soil type, via its texture, water retention capacity and fertility, greatly influences the belowground biological activity (Hole 1981), responsible for the permanent stirring, mixing and transferring of soil particles (Fleming et al 2014; Wilkinson et al. 2009). The low pH and nutrient content characterizing podzols limit the density of animals. In contrast, soil mixing is stronger in fertile soils (e.g. cambisol and luvisol) and primarily ensured by earthworms (Chauhan 2014), whose abundance positively correlates with the abundance of moles, their main predator (Saey et al. 2014). Consistently, we found no spatial autocorrelation of SA on fertile soils, whilst podzol exhibited a spatial pattern at a fine scale (35 cm), suggesting a weaker mix of charcoals in the soil and thus the need of spacing soil samples to get an unbiased picture of the plant community.

Finally, cambisols are expected to support more species than the two other soil types since they are found on calcareous substrates, known to exhibit a big regional species pool compared to acidic soils (Ewald 2003). Consistently, the rarefaction curve did not reach an asymptote, especially in the auger sampling, indicating that the number of species was still increasing with the sampling effort. However, the density and the identified proportion of charcoals was low (57 % in cambisol vs. 75 % in both luvisol and podzol), suggesting a stronger biodegradation (Hilscher et al. 2009) since enzymatic activities of microorganisms responsible for charcoal degradation are maximal for pH values above 7 (Xie et al. 2006).

### **Towards an optimal sampling scheme**

The greater SA values found with the auger, as compared with the pit sampling, indicates a highly heterogeneous distribution of charcoals within upper soil layers. An auger sampling will thus better capture the stand-scale SA picture than a pit sampling, since the latter may return low SA values simply because the pit was dug in a place where few charcoals accumulated. That being said, the number of identified charcoals per volume unit is similar among the two techniques.

In contrast, the pit sampling retrieved a greater number of taxa ( $\gamma$ -diversity) than the auger sampling, despite a much lower area investigated (2.25 m<sup>2</sup> vs. 1000 m<sup>2</sup>). The soil depth thus matters more than the spatial extent in capturing species diversity from buried charcoals.

Since SA increases until the 40 cm soil depth level, a deeper auger sampling (i.e. two superposed 20-cm deep auger samples) would return a more complete picture of the local charcoal diversity. Our results indeed demonstrate that the sampling effort necessary to get a representative picture of the soil charcoal composition is greater when using a pit sampling (from 1000 to 4000 identified charcoals, corresponding to a soil volume of 128 to 469 L, for luvisols and podzols, respectively) than when using an auger sampling (from 500 to 750 identified charcoals, corresponding to a soil volume of 24 to 40 L, for luvisols and podzols, respectively) (see Online Resource 4). Given that digging a soil pit, extracting charcoal from soil samples and identifying charcoals under the microscope are very time-consuming steps, an optimized auger sampling design is a highly suitable alternative. Surprisingly, the auger sampling method has rarely been used in pedoanthracology (e.g. Talon et al. 2005) though more widely used in studies focusing on the amount of charcoals in soils (e.g. Zackrisson et al. 1996, Ohlson et al. 2009). Yet, it has the advantage over the pit sampling method to more readily reflect spatial variations of SA and species composition, even if we found no spatial autocorrelation at the scale assessed in this study.

The sampling effort must be adapted to the soil type and site history to get a representative picture of the local soil charcoal assemblages. Remarkably, our estimated minimal sampling effort is greater than the one advocated in soil charcoal analysis protocols so far, suggesting that classical sampling strategies (e.g. Bergaglio et al. 2006; Dehlon and Thiebault 2005; Dutoit et al. 2009) are insufficient to achieve representativeness, hence casting doubt on some conclusions from many studies.

To achieve representativeness of the soil charcoal signal for the lowest time and effort we thus make the following recommendations:

(i) A minimal number of 500 charcoals randomly taken from soil samples should be taxonomically identified; this number should be increased for soils with a low biological activity (e.g. 750 for podzols), or due to a low charcoal conservation (e.g. 2500 for cambisols).

(ii) A minimal volume of 24 L of soil should be sampled to attain the required 500 charcoals; this volume should be increased in sites that are suspected to have experienced few fires (e.g. moist soils), but can be decreased in sites for which there is a known history of frequent fires (e.g. “industrial” forests, dry soils); this volume should also be increased in base-rich soils because of the greater biodegradation of charcoals.

(iii) When sampling time is a limitation and/or whenever a high spatial heterogeneity in charcoal distribution is suspected and/or when investigating spatial distribution of species is an objective, an auger sampling strategy should be preferred. In this case, the first 40 cm of soil should be collected at each sampling point (e.g. one litre from the 0-20 cm level and another litre from the 20-40 cm level).

(iv) When there is an interest in exploring the deep soil horizons and when time is not limiting, a soil pit sampling is a good strategy. In this case, the volume of soil to be collected should take into account the vertical distribution of charcoals (peak at 0-40 cm; low density below 50 cm).

## 1.6 Acknowledgments

We thank Claire Dehlon and Marie-Claude Bal-Serin for their help in identifying charcoals; Roger Langhor and Jean-Luc Dupouey for their helpful comments; the “Office national des Forêts” for facilitations during fieldwork. This paper is part of TF’s PhD thesis, which was granted the French “Ministère de l’Enseignement et de la Recherche”.

## 1.7 References

- Baker, K.L., Langenheder, S., Nicol, G.W., Ricketts, D., Killham, K., Campbell, C.D. & Prosser, J.I. (2009). Environmental and spatial characterisation of bacterial community composition in soil to inform sampling strategies. *Soil Biological and Biochemistry*, **41**, 2292–2298.
- Bal, M.C, Rendu, C., Ruas, M.P. & Campmajo, P. (2010). Paleosol charcoal: Reconstructing vegetation history in relation to agro-pastoral activities since the Neolithic. A case study in the Eastern French Pyrenees. *Journal of Archaeological Science*, **37**, 1785–1797.
- Bélanger, N., Carcaillet, C., Padbury, G.A., Harvey-Schafer, A.N. & Van Rees, K.J.C. (2014). Periglacial fire and trees in a continental setting of central Canada, Upper Pleistocene. *GeoBiology*, **12**, 109-118.
- Bégin, Y. & Marguerie, D. (2002). Characterization of tree macroremains production in a recently burned conifer forest in northern Québec, Canada. *Plant Ecology*, **159**, 143-152.
- Bergaglio, M., Talon, B. & Médail, F. (2006). Histoire et dynamique des forêts de l’ubac du massif des Maures au cours des derniers 8000 ans. *Forêt méditerranéenne*, **27**, 3–16.
- Björnstad, O.N. (2013). Package ‘ncf’: spatial nonparametric covariance functions. <http://cran.r-project.org/web/packages/ncf/ncf.pdf>
- Bush, M.B., Silman, M.R., McMichael, C. & Saatchi, S. (2008). Fire, climate change and biodiversity in Amazonia: a Late-Holocene perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, **363**, 1795-1802.
- Carcaillet, C. (1998). A spatially precise study of Holocene fire history, climate and human impact within the Maurienne valley, North French Alps. *Journal of Ecology*, **86**, 384-396.
- Carcaillet, C. (2001). Soil particles reworking evidences by AMS 14 C dating of charcoal. *Comptes Rendus de l’Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, **332**, 21–28.
- Carcaillet, C. & Talon, B. (1996). Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols : exemple de quelques sols des Alpes. *Géographie Physique et Quaternaire*, **50**, 233-244.
- Carcaillet, C., Barakat, H.N., Panaïtos, C., Loisel, R. (1997). Fire and late-Holocene expansion of *Quercus ilex* and *Pinus pinaster* on Corsica. *Journal of Vegetation Science*, **8**, 85–94.
- Carcaillet, C. & Thion, M. (1996). Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **91**, 399–416.

- Chao, A., Gotelli, N.J., Hsieh, T.C., Sander, E.L., Ma, K.H., Colwell, R.K. & Ellison, A.M. (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: a framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*, **84**, 45–67.
- Chauhan, R.P. (2014). Role of earthworms in soil fertility and factors affecting their population dynamics: A review. *International Journal of Research*, **1-6**, 642–449.
- Clarke, K., Lewis, M. & Ostendorf, O. (2011). Additive partitioning of rarefaction curves: removing the influence of sampling on species-diversity in vegetation surveys. *Ecological Indicators*, **1**, 132–139.
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A. & Pérez-Obiol, R. (2012). Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, **21**, 373–384.
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A., Rodriguez, J.M. & Pérez-Obiol, R. (2013). Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: A pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach. *Quaternary International*, **289**, 60–70.
- Delhon, C. & Thiébault, S. (2005). The migration of beech (*Fagus sylvatica* L.) up the Rhone: the Mediterranean history of a 'mountain' species. *Vegetation History and Archaeobotany*, **14**, 119–132.
- Dupouey, J.L., Dambrine, E., Laffite, J.D. & Moares, C. (2002). Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity. *Ecology*, **83**, 2978–2984.
- Dutoit, T., Thinon, M., Talon, B., Buisson, E. & Alard, D. (2009). Sampling soil wood charcoals at a high spatial resolution: a new methodology to investigate the origin of grassland plant communities. *Journal of Vegetation Science*, **20**, 349–358.
- Ewald, J. (2003). The calcareous riddle: why are there so many calciphilous species in the Central European Flora? *Folia Geobotanica*, **38**, 357–366.
- Finke, P.A., Vanwalleghem, T., Opolot, E., Poesen, J. & Deckers, J. (2013). Estimating the effect of the tree uprooting on variation of soil horizon depth by confronting pedogenetic simulations to measurements in a Belgian loess area. *Journal of Geophysical Research-Earth*, **118**, 2124–2139.
- Fleming, P.A., Anderson, H., Prendergast, A.S., Bretz, M.R., Valentine, L.E. & Hardy, G.E.S. (2014). Is the loss of Australian digging mammals contributing to a deterioration in ecosystem function? *Mammal Review*, **44**, 94–108.
- Fraterrigo, J.M., Balsler, T.C. & Turner, M.G. (2006). Microbial community variation and its relationship with nitrogen mineralization in historically altered forests. *Ecology*, **87**, 570–579.
- Fréjaville, T., Carcaillet, C. & Curt, T. (2013). Calibration of charcoal production from trees biomass for soil charcoal analyses in subalpine ecosystems. *Quaternary International*, **289**, 16–23.
- Gabet, E.J., Reichman, O.J. & Seabloom, E.W. (2003). The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **31**, 249–263.
- Gavin, D.G., Brubaker, L.B. & Lertzman, K.P. (2003). Holocene fire history of a coastal temperate rain forest based on soil charcoal radiocarbon dates. *Ecology*, **84**, 186–201.
- Goepf, S. (2007). Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme. Université Louis Pasteur-Strasbourg I, Strasbourg.
- Hilscher, A., Heister, K., Siewert, C. & Knicker, H. (2009). Mineralisation and structural

- changes during the initial phase of microbial degradation of pyrogenic plant residues in soil. *Organic Geochemistry*, **40**, 332–342.
- Hole, F.D. (1981). Effects of animals on soil. *Geoderma*, **25**, 75–112.
- Holm, S. (1979). A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, **6**, 65–70.
- Hsieh, T.C., Ma, K.H. & Chao, A. (2015). iNEXT: An R package for interpolation and extrapolation of species diversity (Hill numbers). Submitted manuscript. (<http://chao.stat.nthu.edu.tw/blog/software-download>)
- Jacquot, C., Robin, A.M. & Bedeneau, M. (1973). Reconstitution d'un ancien peuplement forestier en forêt de Fontainebleau par l'étude anatomique de charbons de bois et leur datation par le <sup>14</sup>C. *Bulletin de la Société botanique de France*, **120**, 231–234.
- Kane, V.R., Lutz, J.A., Cansler, C.A., Povak, N.A., Churchill, D.J., Smith, D.F., Kane, J.T. & North, M.P. (2015). Water balance and topography predict fire and forest structure patterns. *Forest Ecology and Management*, **338**, 1–13.
- Langhor, R. (2000). Tree sway turbation of soils as observed on archaeological sites in the sandy area of northern Flanders, Belgium. *Pedologie-Themata*, **8**, 123–129.
- Muukkonen, P., Häkkinen, M. & Mäkipää, R. (2009). Spatial variation in soil carbon in the organic layer of managed boreal forest soil – implications for sampling design. *Environmental Monitoring Assessment*, **158**, 67–76.
- Payette, S., Delwaide, A., Schaffhauser, A. & Magnan, G. (2012) Calculating long-term fire frequency at the stand scale from charcoal data. *Ecosphere*, **3**, art59.
- Plue, J., Hermy, M., Verheyen, K., Thuillier, P., Saguez, R. & Decocq, G. (2008). Persistent changes in forest vegetation and seed bank 1,600 years after human occupation. *Landscape Ecology*, **23**, 673–688.
- Plue, J., Hermy, M. (2012). Consistent seed bank spatial structure across semi-natural habitats determines plot sampling. *Journal of Vegetation Science*, **23**, 505–516.
- Poschod, P. & Baumann, A. (2010). The historical dynamics of calcareous grasslands in the central and southern Franconian Jurassic mountains: a comparative pedoanthracological and pollen analytical study. *The Holocene*, **20**, 13–23.
- R Development Core Team (2013). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ritchie, J.C. (1995). Current trends in studies of long-term plant community dynamics. *New Phytologist*, **130**, 469–494.
- Robin, V., Bork, H.R., Nadeau, M.J. & Nelle, O. (2014). Fire and forest history of central European low mountain forest sites based on soil charcoal analysis: The case of the eastern Harz. *The Holocene*, **24**, 35–47.
- Robin, V., Talon, B. & Nelle, O. (2013). Pedoanthracological contribution to forest naturalness assessment. *Quaternary International*, **289**, 5–15.
- Saey, T., Van Meirvenne, M., De Pue, J., Van De Vijver, E. & Delefortrie, S. (2014). Reconstructing mole tunnels using frequency-domain ground penetrating radar. *Applied Soil Ecology*, **80**, 77–83.
- Schaetzl, R.J., Burns, S.F., Johnson, D.L. & Small, T.W. (1989). Tree uprooting: review of impacts on forest ecology. *Vegetatio*, **79**, 165–176.
- Scheu, S. (1987). The role of substrate feeding earthworms (Lumbricidae) for bioturbation in a beechwood soil. *Oecologia*, **72**, 192–196.
- Schweingruber, F.H. (1990a). Anatomy of European Woods. Bern, Stuttgart.
- Schweingruber, F.H. (1990b). Microscopic Wood Anatomy. Swiss Federal Institute for Forest,

- Snow and Landscape Research, Birmensdorf.
- Talon, B. (2010). Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: evidence from soil charcoal. *The Holocene*, **20**, 35–44.
- Talon, B., Payette, S., Fillion, L. & Delwaide, A. (2005). Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in Southern Québec, Canada, from charred wood in mineral soils. *Quaternary Research*, **64**, 36–43.
- Talon, B., Carcaillet, C. & Thion, M. (1998). Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes françaises. *Géographie Physique et Quaternaire*, **52**, 195–208.
- Taylor, A.H. & Skinner, C.N. (2003). Spatial patterns and controls on historical fire regimes and forest structure in the Klamath Mountains. *Ecological Applications*, **13**, 704–719.
- Thion, M. (1992). L'analyse pédoanthracologique. Aspects méthodologiques et applications. Université d'Aix-Marseille, Marseille.
- Thion, M. (1978). Pedoanthracologie : une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le Néolithique. *Comptes rendues hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, **287**, 1203–1206.
- Touflan, P., Talon, B. & Walsh, K. (2010). Soil charcoal analysis: a reliable tool for spatially precise studies of past forest dynamics: a case study in the French southern Alps. *The Holocene*, **20**, 45–52.
- Touflan, P. & Talon, B. (2009). Spatial Reliability of Soil Charcoal Analysis: The Case of Subalpine Forest Soils. *Ecoscience*, **16**, 23–27.
- Wilkinson, M.T., Richards, P.J. & Humphreys, G.S. (2009). Breaking ground: pedological, geological and ecological implications of soil bioturbation. *Earth-Science Reviews*, **97**, 257–272.
- Xie, H., Zhuang, X., Bai, Z., Qi, H. & Zhang, H. (2006). Isolation of levoglucosan-assimilating microorganisms from soil and an investigation of their levoglucosan kinases. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **22**, 887–892.

## 1.8 Online Resources

### 1.8.1 Online Resource 1

#### Vertical and horizontal distribution of SA for Compiègne and Saint-Gobain forests.

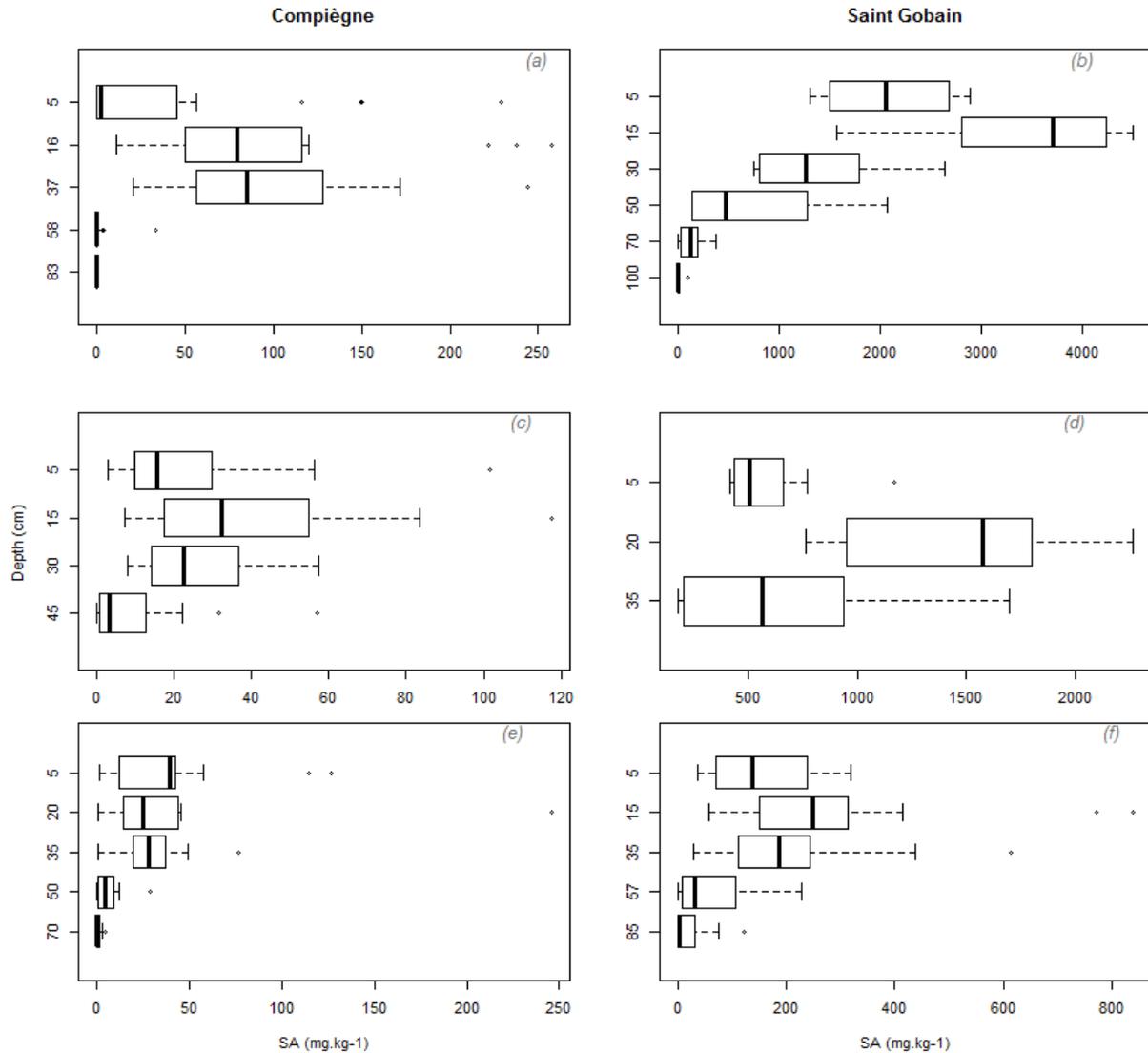


Figure 37 : Boxplot for the distribution of SA (mg/kg) by depth level (cm) for the six soil pits, for Saint Gobain (on the right) and Compiègne (on the left). (a)-(b): podzol, (c)-(d): cambisol, (e)-(f): luvisol.

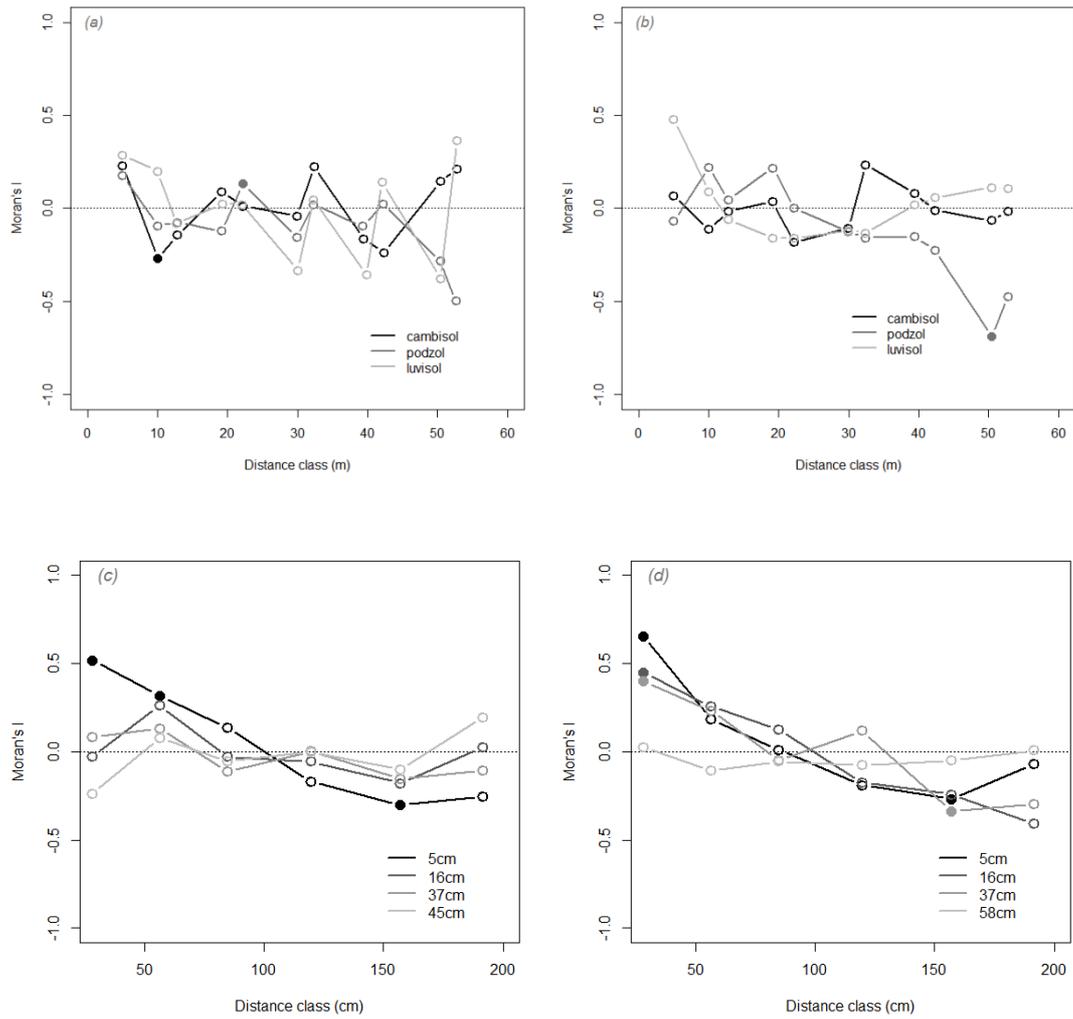


Figure 38 : Correlograms accounting for the spatial autocorrelation in the anthracomass distribution. (a) auger sampling from Saint Gobain; (b) auger sampling from Compiègne; (c) pit sampling of the cambisol from Compiègne; (d) pit sampling of the podzol from Compiègne. (○= not significant, ●= significant  $p < 0.1$ ).

### 1.8.2 Online Resource 2

#### Taxa identified from soil charcoal analysis in the Compiègne forest.

Tableau 11 : List of taxonomic diversity by study sites (podzol, cambisol and luvisol) and the sampling methods (soil pit and auger).

Taxonomic diversity	Sampling methods					
	Soil pit			Auger		
	Podzol	Cambisol	Luvisol	Podzol	Cambisol	Luvisol
<i>Acer sp</i>				X	X	
<i>Betula sp</i>	X	X	X		X	X
<i>Carpinus betulus</i> L.			X	X		X
<i>Corylus avellana</i> L.	X	X	X	X		X
<i>Fagus sylvatica</i> L.	X	X	X	X	X	X
<i>Fraxinus excelsior</i> L.			X			X
<i>Ilex aquifolium</i> L.	X	X			X	
<i>Pinus sp</i>			X			
<i>Pinus sylvestris</i> L.	X					
<i>Pomoideae</i>	X	X	X		X	X
<i>Populus sp</i>	X	X	X	X	X	X
<i>Prunus avium</i> L.		X		X		
<i>Prunus sp</i>	X					
<i>Quercus sp</i>	X	X	X	X	X	
<i>Rhamnus cathartica</i> L.		X				
<i>Rosaceae</i>					X	
<i>Ulmus sp</i>	X					
<i>Viburnum lantana</i> L.	X	X				

### 1.8.3 Online Resource 3

#### Additive partitioning of the biodiversity and slope parameters.

Tableau 12 : Results of additive partitioning of biodiversity and slope parameters of individual and sample-based rarefaction curves for the three sites of Compiègne forest.  $\alpha$  charcoals,  $\gamma$  charcoals,  $\alpha$  liters and  $\gamma$  liters items indicate the numbers of charcoals or liters taken into account to obtain the  $\alpha$  and  $\gamma$  values.

Soil type	Levels	Number of identified charcoals						Number of liters					
		$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$ charcoals	$\gamma$ charcoals	Slope	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$ liter	$\gamma$ liter	Slope
Podzol	Auger sample	1.81	5.19	7	10	569	0.35	1.3	5.7	7	1	30	0.52
	Soil pit (0-16 cm)	2.79	5.21	8	10	408	0.31	2.38	5.13	7.51	1	30	0.37
	Soil pit	2.98	8.02	11	10	853	0.32	1.48	9.52	11	1	100	0.41
	Depth 5 cm	3.38	1.62	5	10	41	0.35	1.64	3.36	6	1	20	0.32
	Depth 16 cm	2.71	3.29	6	10	361	0.24	2.9	3.1	6	1	20	0.25
	Depth 37 cm	3.02	4.98	8	10	446	0.26	3.15	4.85	8	1	20	0.31
	Depth 58 cm	-	-	2	-	5	-	0.2	1.8	2	1	20	0.31
	Depth 70 cm	-	-	0	-	0	-	0	0	0	1	20	-
Cambisol	Auger sample	1.81	6.19	8	10	260	0.45	1.46	6.54	8	1	30	0.56
	Soil pit (0-16 cm)	3.85	4.15	8	10	211	0.28	2.34	5.36	7.7	1	30	0.33
	Soil pit	4	6	10	10	396	0.27	2.14	7.86	10	1	78	0.31
	Depth 5 cm	3.32	2.68	6	10	79	0.34	2.05	3.95	6	1	18	0.38
	Depth 16 cm	4.01	2.99	7	10	132	0.28	2.6	4.1	6.89	1	18	0.27
	Depth 37 cm	3.78	5.22	9	10	151	0.34	2.8	5.7	8.5	1	18	0.34
	Depth 45 cm	3.73	0.27	4	10	34	0.29	1.46	2.54	4	1	15	0.44
Luvisol	Auger sample	3.52	3.48	7	10	632	0.18	2.1	4.9	7	1	25	0.33
	Soil pit (0-20 cm)	3.42	3.58	8	10	258	0.28	2.91	5.09	8	1	25	0.29
	Soil pit	3.52	5.48	9	10	479	0.26	2.32	6.68	9	1	62	0.28
	Depth 5 cm	3.93	3.07	7	10	116	0.29	3.17	3.66	6.83	1	11	0.32
	Depth 20 cm	2.82	4.18	7	10	142	0.34	2.66	4.09	6.53	1	11	0.33
	Depth 35 cm	3.38	2.62	6	10	176	0.25	3.46	2.38	5.84	1	11	0.25
	Depth 50 cm	4.17	2.83	7	10	41	0.46	2.09	4.81	7	1	11	0.50
Depth 70 cm	-	-	2	-	4	-	1	1	3	1	11	-	

1.8.4 Online Resource 4

Sample-based rarefaction curves analysis for the three soil types for Compiègne.

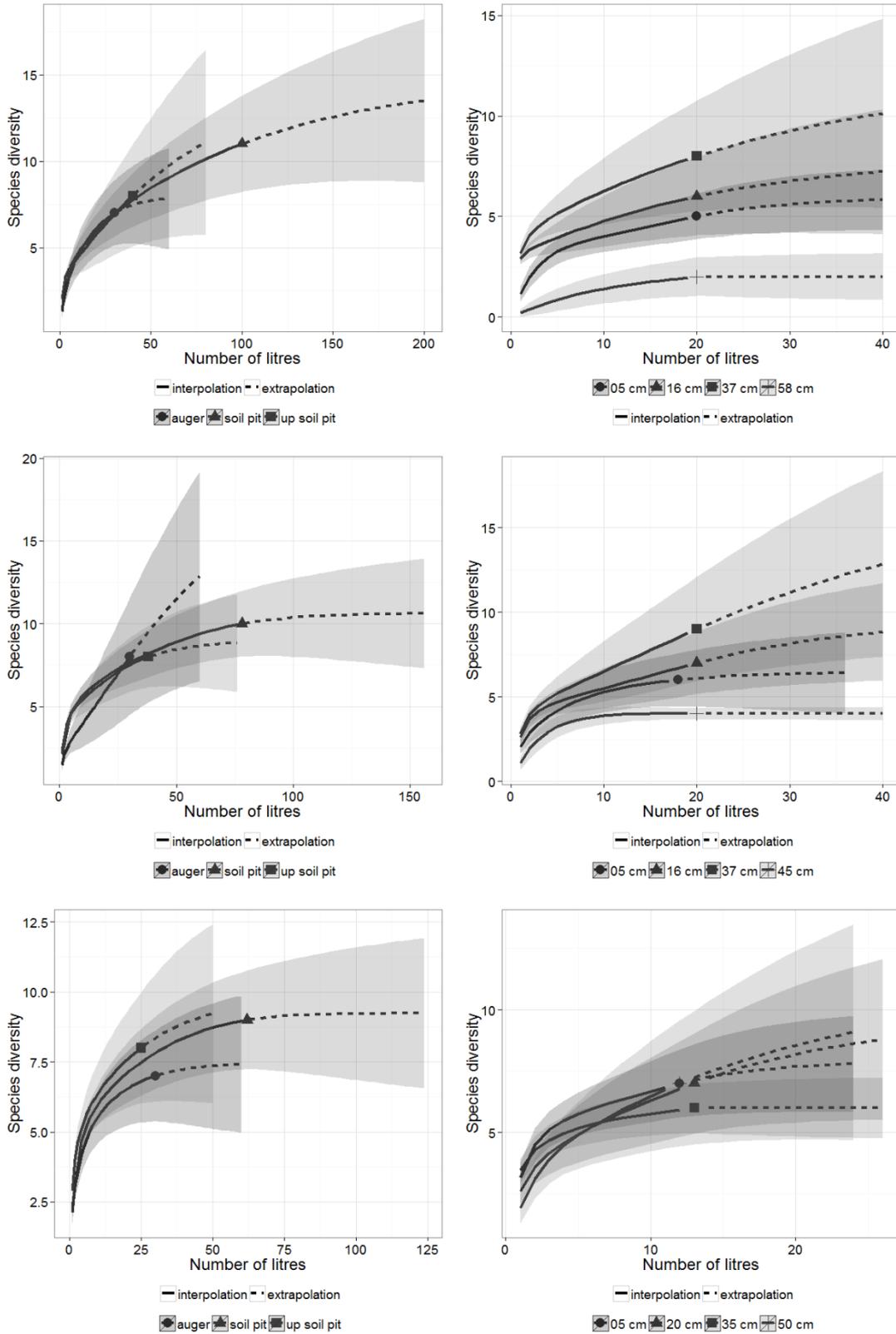


Figure 39 : Rarefaction curves with their 95% confidence interval for the different soil types (top: podzol; middle: cambisol; bottom: luvisol) of Compiègne, based on the number of soil litres. Left panels: comparison between the pit, auger and up-soil-pit. Right panels: soil-depth levels of the pit. Solid lines: interpolated curves; dotted lines: extrapolated curves.

## 2 Discussion complémentaire

L'objectif de cette deuxième partie du chapitre III est de discuter de la prédictibilité de la distribution des anthracomasses dans l'espace. Les figures ci-dessous viennent en complément de l'article précédent et permettent de visualiser l'hétérogénéité de la répartition horizontale des charbons pour les maillages tarières. Elles illustrent également les changements d'anthracomasses pour chacun des horizons des fosses pédologiques du podzol de Compiègne où une autocorrélation spatiale est détectée. Les autres fosses sont données en Appendice 4.

Dans chaque cas, on peut se référer au tableau 10 pour se rappeler les paramètres de distribution des charbons (cf. médiane  $\pm$  l'erreur standard) ainsi que la figure 38 de « l'Online resource 1 » pour faire le lien avec les résultats de l'autocorrélation spatiale établis à partir de l'indice I de Moran.

La figure 40 est une illustration des distributions des six grilles de prélèvements tarières. Y est affichée une forte hétérogénéité dans les valeurs d'anthracomasses spécifiques (SA  $\text{mg.kg}^{-1}$ ). Les indices de corrélations spatiales ne sont pas significatifs au seuil de  $p < 0.1$  pour l'ensemble des sites.

Pour le luvisol de Compiègne où la quasi-totalité des charbons sont regroupés sur 2 sondages voisins (Figure 38b et 40e), une corrélation spatiale est détectée mais au seuil de  $p < 0.3$ . Malgré ce faible seuil de significativité, nous utiliserons tout de même ce dernier site pour tenter un modèle prédictif de la distribution potentielle des charbons pour les 20 premiers centimètres du sol. Pour ce faire, un krigeage<sup>25</sup> est appliqué au jeu de données pour obtenir une cartographie des anthracomasses (Figure 41). Ce traitement du signal spatial par krigeage est une des perspectives finales pour ce qui concerne l'approche spatiale. Cette prédiction est proposée pour l'anthracomasse globale (SA) ainsi que pour l'anthracomasse spécifique du taxon (SAT) dominant, à savoir *Fagus sylvatica*. Le test d'autocorrélation spatiale pour cette dernière indique la même distribution spatiale que l'anthracomasse globale et un même signal significatif à  $p < 0.3$  pour la première classe de distance (5 m) (Appendice 5<sup>26</sup>).

---

<sup>25</sup> "gstat" package (Pebesma & Graeler 2016) sous R (R Development Core Team 2015).

<sup>26</sup> On trouvera également en Appendice 5 les semi-variogrammes qui ont servi aux krigeages.

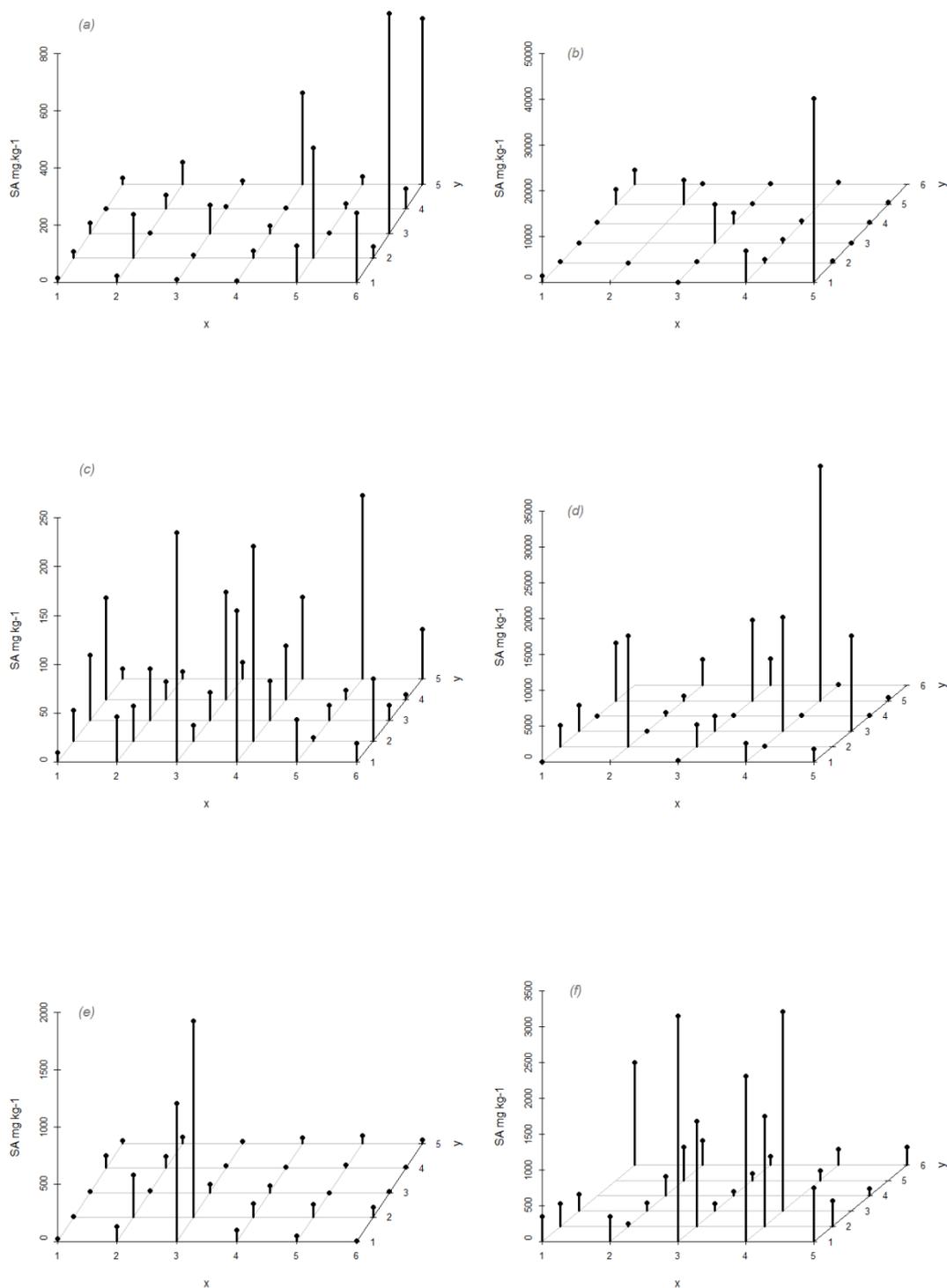


Figure 40 : Répartition spatiale des valeurs des anthracomasses pour les 6 maillages tarières des forêts de Compiègne à gauche et de Saint Gobain à droite. (a) et (b) pour podzol, (c) et (d) pour cambisol, (e) et (f) pour luvisol.

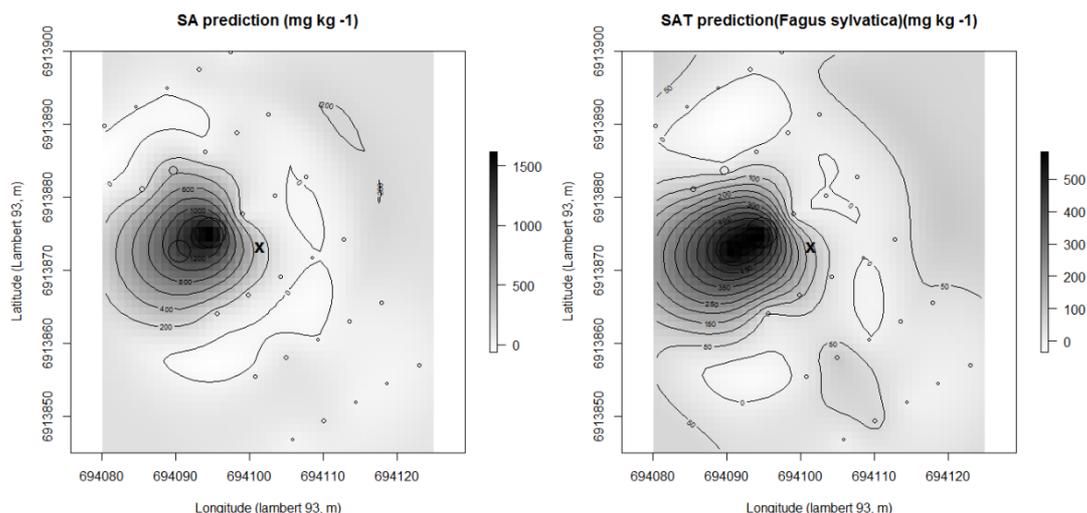


Figure 41 : Cartes des prédictions des valeurs d'anthracomasses ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) à gauche et des valeurs d'anthracomasses spécifiques pour le hêtre à droite sur  $1000 \text{ m}^2$  pour le luvisol de Compiègne. Sont représentés les 30 prélèvements tarières (o) ainsi que l'emplacement de la fosse pédologique (X).

Pour tester la validité de ce modèle prédictif, le tableau 13 ci-dessous propose une comparaison entre la prédiction de l'abondance de charbons pour la couche 0-20 cm de la fosse et la valeur réelle de cette dernière.

Tableau 13 : Comparaison des valeurs d'anthracomasses prédites et réelles pour l'anthracomasse totale et celle du hêtre. La médiane  $\pm$  erreur standard est donnée pour les valeurs réelles.

	<b>Anthracomasse (<math>\text{mg.kg}^{-1}</math>)</b>	<b>Anthracomasse du hêtre (<math>\text{mg.kg}^{-1}</math>)</b>
<b>Prédiction</b>	200 - 300	100 - 150
<b>Réelle</b>	$31.18 \pm 10.53$	$12 \pm 4.7$

En raison du signal d'autocorrélation spatiale faible, le modèle ne fonctionne pas car les valeurs prédites sont nettement surestimées. Le but était cependant d'illustrer l'intérêt de capter le patron de distribution pour prévoir la distribution spatiale des charbons et des taxons.

L'absence de corrélation spatiale implique alors de considérer chaque sondage tarière comme un individu propre. Avec un éloignement de 5 m entre prélèvements, il est erroné de traiter les 30 tarières comme une même population, chacune étant un cas particulier. Cependant, nous n'avons pas testé la gamme 1-4 m d'éloignement entre voisins ce qui ne permet pas d'exclure la présence d'un patron de distribution des anthracomasses pour ces échelles de distance.

Nous obtenons en revanche une autocorrélation spatiale pour les horizons de la fosse du podzol de Compiègne. Les échantillons montrent un pattern de distribution entre voisins à une distance de 35 cm. La figure ci-dessous (Figure 42) présente la répartition des anthracomasses pour ce site selon le placement des échantillons sur les faces de la fosse et les niveaux de prélèvements. L'activité biologique d'un sol semble être un facteur discriminant pour ne pas préserver une structuration dans la distribution des charbons à petite échelle. C'est du moins l'explication la plus logique pour justifier un signal spatial dans le podzol, sol sableux et pauvre en activité biologique, et non pas dans le cambisol, sol riche et très actif en bioturbations.

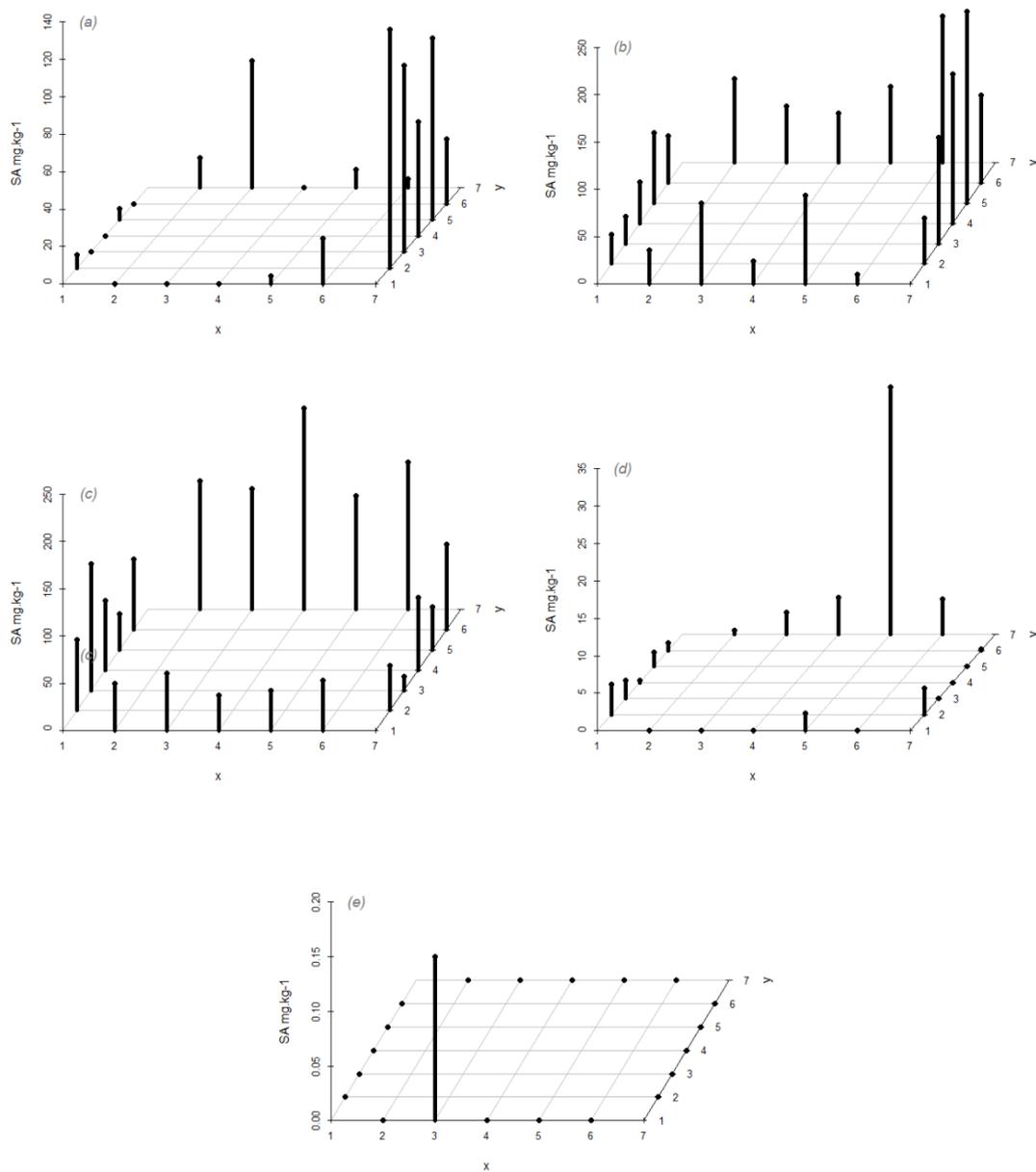


Figure 42 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 5 horizons de la fosse du podzol de Compiègne. (a) pour 5 cm, (b) pour 16 cm, (c) pour 37 cm, (d) pour 58 cm et (e) pour 83 cm.

### 3 Conclusion

Les questions de l'effort d'échantillonnage, de la représentativité statistique et de la variabilité spatiale de l'enregistrement pédoanthracologique ont été traitées dans ce chapitre et dans cet article à partir d'un protocole couplant deux méthodes de prélèvement et des traitements statistiques habituellement employés en écologie.

#### **1. La variabilité spatiale des données anthracologiques est-elle prévisible ou aléatoire ?**

Une importante variabilité de la distribution des anthracomasses a été constatée. L'échelle de résolution spatiale de la pédoanthracologie est difficile à fixer car nous ne décelons aucun résultat significatif à 5 m de distance entre voisins, seulement des résultats mitigés pour les horizons des fosses à 35 cm. Le type de sol (cambisol, podzol) et l'activité biologique sont des éléments perturbateurs majeurs. Ils influencent la conservation des charbons mais également leur répartition dans l'espace. Il existe de très nombreux phénomènes pédologiques et biotiques conduisant à un mélange aléatoire des charbons dans le sol. Citons principalement ici les bioturbations (faune et flore du sol) et les chablis. Bien sûr l'homme pourrait être un facteur de perturbations important de par ses techniques agricoles (labour) et sylvicoles (dessouchage, travail du sol avant plantation) mais dans notre zone d'étude un continuum forestier est en place depuis plusieurs siècles. L'influence de l'homme sur laurbation des sols est à écarter ici. Mais ajoutons le mélange aléatoire des charbons, la variabilité de la disposition des végétaux avant incendie, ainsi que l'imprévisibilité du dépôt carboné lors de l'épisode de feu et nous comprendrons la complexité de l'archivage anthracologique dans un sol. Il reste en revanche à tester d'autres échelles de distance avec par exemple l'intervalle 1-4 m qui n'a pas encore été exploré. Par ailleurs, nous avons usé d'un maillage systématique pour placer nos 30 tarières alors qu'une disposition aléatoire des prélèvements offrirait peut-être des résultats plus significatifs par rapport à la variable anthracologique. Il s'agit d'une autre piste à examiner.

#### **2. Existe-t-il une stratégie d'échantillonnage optimale pour mener une étude des charbons du sol ?**

Les différents résultats orientent la réponse à cette question vers une stratégie d'échantillonnage mêlant une prospection verticale, à l'aide de fosses pédologiques, à une prospection horizontale par le biais d'un maillage tarière d'au moins 1000 m<sup>2</sup>. La prospection horizontale est à mettre en œuvre en premier afin d'y choisir le(s) emplacement(s) des fosses.

Le seuil de représentativité statistique est atteint 2 fois (podzol et luvisol) sur 3 par les tarières, ce qui ne nous permet pas d'affirmer qu'une méthode est plus fiable que l'autre sur ce point. Les fosses recueillent plus de diversité car elles explorent des horizons plus profonds. Notons que les couches pédologiques situées sous les 40 cm de profondeur sont peu enclines à délivrer de nouveaux taxons et sont donc moins intéressantes à examiner. En revanche la vitesse d'acquisition de la diversité spécifique penche systématiquement en faveur du sondage tarière spatialisé. S'ajoute à cela la facilité d'application de cette méthode. La technique tarière pourrait être perçue comme plus destructrice en raison du mouvement rotatif dans le sol de l'outil engendrant une fragmentation des charbons.

Néanmoins, les poids moyens des charbons prélevés par les deux méthodes (fosse 0-20 cm : 4.92 mg et tarière : 4.87 mg) prouvent l'absence d'impact de la technique d'extraction.

Le choix entre les deux protocoles fosses complètes ou tarières est aussi fonction du temps et des moyens humains disponibles ainsi que de la visée de l'étude, paléo-écologique ou écologie historique. La paléo-écologie préférera la prospection en profondeur et très détaillée de la fosse afin de recueillir un maximum de diversité et donc de témoignages d'évènements durant l'Holocène. De son côté, l'écologie historique optera plutôt pour les tarières ou mini-fosses afin de gagner en représentativité.

Dans cette optique, nous pouvons construire un protocole d'échantillonnage idéal qui permettrait de lisser au maximum les causes de variabilités spatiales et verticales tout en conservant un effort d'échantillonnage représentatif de la diversité taxonomique. Ce protocole est fondé sur un carottage des 40 premiers centimètres du sol selon trois mailles d'échantillonnages (Figure 43) : i) le massif forestier s'étendant sur 40 ha, ii) le peuplement sur 0.1 ha et enfin iii) le local se resserrant à 2 m<sup>2</sup>.

La maille la plus vaste couvre une surface de 40 000 m<sup>2</sup>. Elle se compose de 30 sites de prélèvements de 1000 m<sup>2</sup> régulièrement répartis et espacés de 100 m en abscisse et 200 m en ordonnée. Son intérêt est de gommer la variabilité induite par les changements stationnels tout en explorant une surface similaire à la portée d'un incendie.

L'échelle intermédiaire correspond à 30 placettes de 2 m<sup>2</sup> systématiquement positionnées sur 1000 m<sup>2</sup>. Elles sont séparées de 5 m en X et de 10 m en Y. Ce second échelon intègre les variations dues à l'emplacement des végétaux ligneux au sein d'un peuplement forestier.

Enfin, le dernier niveau de 2 m<sup>2</sup> contient une maille de 32 sondages tarières ordonnés et distants de 30 cm les uns par rapport aux autres. La taille de cette placette est déterminée en raison de la surface de nos fosses (2.25 m<sup>2</sup>) dans lesquelles nous avons recueilli un maximum de diversité. Quant à l'espacement de 30 cm, il est fixé en cohérence avec les résultats de l'autocorrélation spatiale révélant une structure à 35 cm. En outre, cette distance est idéale pour tenir compte de l'impact de la bioturbation.

L'ensemble des prélèvements sont effectués sur une profondeur de 0-40 cm afin de recueillir les espèces enfouies dans les niveaux qui, selon notre étude et l'état de l'art, sont systématiquement les plus riches en masses et en diversité. Dans le cas d'un sol présentant une charge en éléments grossiers importante (> 20%), la prospection tarière s'en trouverait compromise. Il faudra alors envisager un échantillonnage de huit mini-fosses de taille 30\*30\*40 cm équitablement positionnées dans la placette. On procédera alors aux prélèvements sur chacune des faces, ce qui amènera aux 32 échantillons préconisés initialement. Cette méthode rapide permettra également de procéder à une description morphologique des sols avant prélèvements.

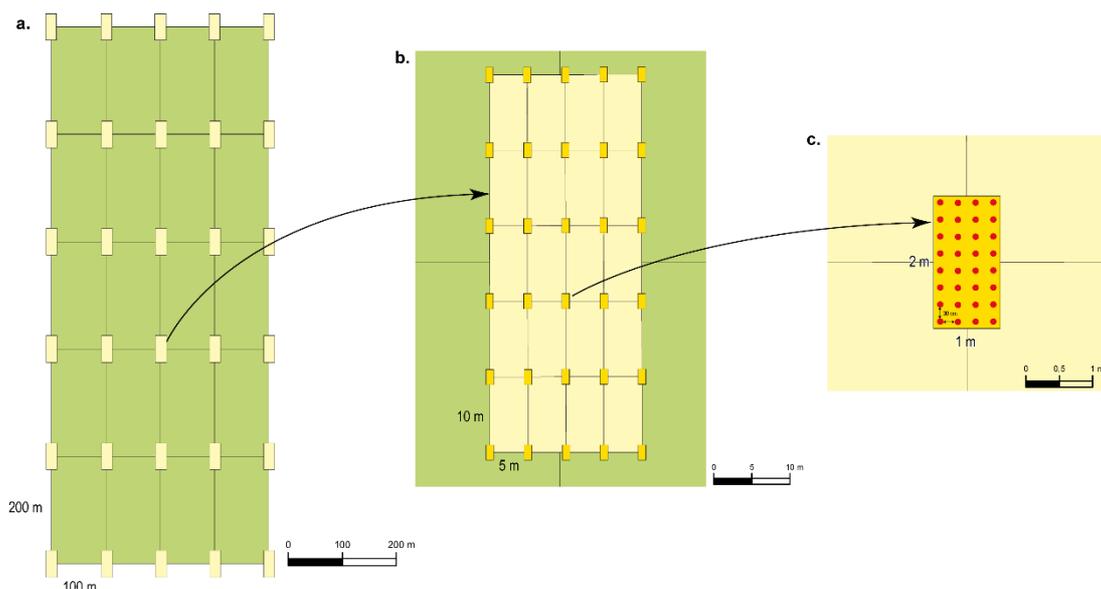


Figure 43 : Proposition de protocole pédoanthracologique prenant en compte la variabilité horizontale et verticale des dépôts. Trois échelles spatiales sont proposées : (a) maillage systématique de 30 sites de 1000 m<sup>2</sup> réparties sur 400 000 m<sup>2</sup> (rectangle de 400 \* 1000 m). Le centre de chaque site est espacé de 100 m en X et 200 m en Y. (b) représente un site de 1000 m<sup>2</sup> (rectangle de 20 \* 50 m) composé de 30 placettes de 2 m<sup>2</sup> systématiquement réparties et dont les centres sont espacés de 5 m en X et 10 m en Y. (c) pour la placette de 2 m<sup>2</sup> constituée de 32 sondages tarières espacés de 30 cm en X et en Y et explorant la profondeur 0-40 cm.

Les échantillons ainsi recueillis seront composites verticalement, par le mélange des horizons sur 40 cm, mais aussi horizontalement, par la fusion des sondages de la placette dont 1 litre sera extrait et traité en laboratoire. Cet échantillon mixte doit permettre de prendre en compte l'impact de la bioturbation sur le déplacement des charbons et des taxons.

Après extraction des charbons et identification anatomique, les 30 placettes seront également moyennées entre elles afin de produire un seul diagramme anthracologique par site, représentatif du peuplement et de la variation du positionnement des essences ligneuses dans l'espace. De cette manière, chaque site sera caractérisé par un assemblage anthracologique puis soumis à une comparaison avec les 29 autres sites. A cette échelle, les effets stationnels et « ampleur d'incendie » seront pris en compte.

Le dispositif complet comprend 28 800 sondages générant 900 l d'échantillons à traiter après le rassemblement des 32 prélèvements par placette en un sous-échantillon de 1 l. Cependant, ce protocole « idéal », pour qu'il soit facilement réalisable, doit être raisonné en quantité et en temps de traitement. Il peut donc être adapté en modérant l'effectif de sites, de placettes et de sondages.

Il peut aussi être modelé par le choix de l'échelle de mesure : étude à l'échelle du peuplement ou à l'échelle de la placette.

A l'échelle du peuplement, l'échantillonnage consiste à s'en tenir aux 30 placettes soit 30 sous-échantillons de 1 l.

A l'échelle de la placette, des variations locales très fines peuvent être recherchées grâce à l'exploitation de l'intégralité des 32 prélèvements tarières.

### **3. Peut-on déterminer un effort minimal d'échantillonnage afin d'être représentatif de l'anthracocénose du sol ?**

L'emploi des courbes de raréfactions a mis en évidence un effort minimal d'échantillonnage concernant les prélèvements sur le terrain et les identifications de charbons en laboratoire. Le minimum est fixé à 24 l de sol extrait et/ou 500 charbons taxonomiquement identifiés pour la couche 0-20 cm du sol. Il évolue à 128 l et 1000 charbons pour une fosse complète. Ces valeurs pouvant ensuite augmenter considérablement en fonction du type de sol (forte activité biologique = fort effort d'échantillonnage) et de l'histoire de l'écosystème forestier (utilisation industrielle ou non).

### **4. Peut-on établir un protocole standardisé en pédoanthracologie ?**

Au regard des résultats obtenus et de leurs variations en fonction du type de sol et de l'histoire d'une forêt, il apparaît difficile de promouvoir un protocole standardisé qui permettrait de recueillir systématiquement un échantillon représentatif de l'anthracocénose d'un milieu. Le protocole est donc influencé par les paramètres naturels de la zone d'étude. C'est finalement les critères de temps de travail ou de surface à explorer qui vont conditionner la méthode de prélèvement. Dans tous les cas, il sera essentiel de respecter deux règles de bases :

- Nécessité d'une approche spatialisée.
- Exploitation prioritaire des 40 premiers centimètres du sol.



## Chapitre IV : Histoire et dynamique de la forêt de Compiègne

---

Le massif forestier de Compiègne affiche une histoire riche depuis l'Antiquité et très bien documentée. Les différentes prospections archéologiques qui ont eu lieu au XX<sup>ème</sup> siècle ainsi que les recherches en archives synthétisées dans la thèse de doctorat de Bocquillon (2000) et dans le mémoire d'H.D.R. de Buridant (2008) mettent à disposition des informations précises sur cette histoire durant l'occupation romaine, le Moyen-Âge et les temps modernes. En revanche, ce territoire forestier est vierge de toute prospection paléo-écologique. Certes nous disposons de quelques données palynologiques (Malrain *et al* 2006) et anthracologiques (Pernaud 1997) mais celles-ci proviennent de séquences archéologiques situées à proximité de la forêt et non en son sein. Cette thèse est la première étude pédoanthracologique appliquée à Compiègne mais également au nord de la France en ce qui concerne les écosystèmes boisés.

L'objectif de cette partie est de mettre en relation étroite l'analyse pédoanthracologique et l'écologie historique. Les conditions climatiques influencent grandement les compositions en essences ligneuses mais l'homme, depuis l'Antiquité, impacte et façonne également les paysages comme celui de Compiègne. L'intérêt sera donc de croiser les informations anthracologiques, historiques et archéologiques pour voir quels scénarii de l'évolution forestière de Compiègne peuvent émerger.

Ce chapitre est composé de l'article « *Historical ecology of lowland forests: does pedoanthracology support historical and archaeological data?* » soumis à la revue Quaternary International. Trois grandes questions de recherche vont être posées ici, à savoir :

### **1. L'utilisation des deux méthodes d'échantillonnage permet-elle une meilleure représentation de la diversité taxonomique de l'anthracocénose du sol ?**

Les pics de diversité spécifique anthracologique sont systématiquement localisés dans la fenêtre 15-35 cm de profondeur des fosses pédologiques. Pour cette raison principalement, les tarières révèlent moins de diversité car elles explorent la couche 0-20 cm du sol. Par l'approche taxonomique, il nous faut maintenant savoir de quelle nature sont les taxons qui disparaissent et si, malgré un cortège plus restreint, la dimension spatiale du maillage tarières nous permet d'inventorier de nouvelles espèces.

## **2. Peut-on se fonder sur la distribution verticale des charbons pour repérer les changements passés des essences forestières ?**

L'hypothèse avancée serait que la succession des incendies passés soit encore visible dans les sols par les assemblages anthracologiques qui suivent une structuration verticale et diffèrent selon les horizons. La profondeur des essences ainsi retrouvées pourrait indiquer l'ancienneté des changements dans le couvert forestier ou dans les stades de successions de la recolonisation forestière. La stratification pédoanthracologique nous permettrait d'avoir une lecture des évolutions en espèces dans le temps qui tradiraient les changements dans les paysages et/ou les stades sylvicoles.

## **3. Par l'intégration de la pédoanthracologie à l'écologie historique, pouvons-nous produire une lecture fiable des changements d'usages des sols depuis l'Antiquité ainsi que de l'évolution forestière du massif de Compiègne depuis le Moyen-Âge ?**

Si la pédoanthracologie permet une reconstitution des paysages passés, est-elle un outil dans la compréhension des interactions entre humains et environnement naturel ? L'enjeu sera de mesurer l'ampleur de l'impact de l'homme sur le façonnage du paysage compiégnais. Les changements d'usages qui ont eu lieu sur ce territoire durant l'Antiquité, identifiés par les historiens et les archéologues, sont peut-être visibles par l'étude des charbons de bois. Il en va de même avec l'influence de l'homme durant le Moyen Âge (agriculture, pâturage et autres usages) qui a potentiellement modifié les cortèges floristiques.

Sur une échelle de temps plus ancienne (du préboréal au subatlantique), étant donné que la plupart des études pédoanthracologiques retrouvent des artefacts forestiers très anciens, bien antérieurs à l'Antiquité, nous détecterons potentiellement des indices sur l'état boisé de la zone d'étude durant l'Holocène.

# 1 Historical ecology of lowland forests: does pedoanthracology support historical and archaeological data?

**Thomas Feiss<sup>1</sup>, Hélène Horen<sup>1</sup>, Boris Brasseur<sup>1</sup>, Jérôme Buridant<sup>1</sup>, Emilie Gallet-Moron<sup>1</sup> and Guillaume Decocq<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ecologie et Dynamique des Systèmes Anthropisés (EDYSAN, FRE 3498 CNRS-UPJV), Université de Picardie Jules Verne, 1 rue des Louvels, 80037 Cedex 1, France.

## 1.1 Abstract

Historical ecology is a cross-disciplinary approach which uses various sources to reconstruct past ecosystems and landscapes, and their interactions with human activities. Here we assess the potential contribution of soil charcoal analysis to the understanding of the dynamics of forest-human relationships in a temperate deciduous forest of North France since the Roman times. We conducted a soil charcoal analysis in three contrasted forest stands and soil types (podzol, cambisol and luvisol) using two sampling techniques (pit and auger), and subsequently compared the results to archaeological and historical data, including LiDAR imagery. We show that (i) combining two sampling techniques can more readily reflect the local charcoal assemblages than the traditional pit sampling alone; (ii) the vertical distribution of charcoals cannot be taken as a surrogate for temporal vegetation changes, as a probable consequence of biological mixing among soil horizons; (iii) once dated, soil charcoal assemblages provide support to an early medieval forest colonisation of formerly cultivated sites, the subsequent maintenance of open-canopy forests until the 18<sup>th</sup> century, and a recent canopy closure. We conclude that pedoanthracology solely cannot solve the question of forest vegetation changes over time, but can provide support to hypotheses made from other approaches such as field archaeological surveys.

**Keywords:** forest vegetation; human impact; past land use; succession; soil charcoal analysis; soil type.

## 1.2 Introduction

Today's biodiversity is a legacy of the interactions between natural processes and human activities (Swetnam et al., 1999). At local to landscape scales, past human land-uses are increasingly recognized as important drivers of modern vegetation patterns and ecosystem functioning (Fraterrigo et al., 2006, Dambrine et al., 2007, Plue et al., 2008). In this context, there is a growing interest in the recently emerged sub-discipline of historical ecology, which aims at tracing the relationship between humans and the ecosystems and landscapes they live in, charted over the long term (Swetnam et al., 1999, Egan and Howell, 2001, Szabó, 2015). Historical ecology relies on various sources, among which historical documents, archaeological data, present biodiversity surveys (Egan and Howell, 2001), and also paleo-ecological data (Elias, 2007). For the recent history, aerial or terrestrial photographs (Miller, 1999, Boucher et al., 2009), satellites pictures (Song et al., 2015) and oral interviews (Gimmi and Burgi, 2007) are privileged resorts. Written accounts such as management plans, tax registers, land survey records and various thematic maps contain valuable information about vegetation, the amount of livestock and population, and thus land use (Dahlström, 2008, Yang et al., 2014). Since historical sources are chronologically and regionally unevenly preserved, the reconstruction of landscapes and vegetation over several centuries needs to combine different sources (Petit and Lambin, 2002, Nielsen and Odgaard, 2004). Precious information about past land uses can be provided by archaeological contexts, which benefit from aerial photographs (Agache, 1979) and, more recently, airborne LiDAR data for archaeological prospection in forests (Kraus and Pfeiffer, 1998, Georges-Leroy et al., 2011).

Biological archives contained in soils or sediments have been widely used to reconstruct past land use over various time scales. Pollen analyses are probably the most widely used proxy for reconstructing past plant communities and their relationships with human activities (Edwards and Mac Donald, 1991, Brun, 2011), but others proxies are increasingly used, such as ancient DNA (Schlumbaum et al., 2008), molecular biomarkers (Lavrieux et al., 2012), plant macroremains (Warnick et al., 2014) and charcoal assemblages (Thinon, 1978, 1992, Robin et al 2015).

Soil charcoal analysis addresses ecosystems that have supported, at least temporary, woody plants. It allows reconstructing past fire events (Fesenmyer and Christensen, 2010) and the identification of the associated burnt woody material (Talon, 2010). Following a fire, charcoals are fragmented with time, buried and preserved over millennia, hence are a ubiquitous proxy in past environment studies (Ritchie, 1995). However, the representativeness of charcoal assemblages and their potential for past ecosystem reconstruction are biased by several filters. This first filter is specific to pedoanthracological studies while others such as combustion and post-depositional disturbances are shared with taphonomic processes encountered in archaeological contexts (Théry-Parisot et al. 2010). The conversion of woody biomass into charcoals is a species-specific process but is also controlled by heating conditions such as temperature, length of exposure, heating rate (Braadbaart and Poole, 2008), factors like humidity, wood density, bark thickness and trunk diameter (Rossen and Olson, 1985, Fréjaville et al., 2013), as well as local environmental conditions (Théry-Parisot et al., 2009). The last filter consists of post-depositional processes leading to burying, fragmentation (Chabal, 1994, Chrzavzez, 2013) and mixing of charcoals

by soil biota (Carcaillet, 2001, Schwartz et al., 2005), so that pedoanthracological studies can hardly resolve the temporal sequence of vegetation changes.

Due to pros and cons of each discipline, reconstructing past land use and landscape is more efficient when several approaches are combined (Spek, 1998, Yang et al., 2014). In this study, we compared the results from a soil charcoal analysis to historical records and local archaeological data for three contrasted sites of a lowland temperate forest, in order to reconstruct landscape changes since the Roman times. More specifically, we question whether combination of soil charcoal assemblages and archaeological data are consistent and complementary to understand the relationships between human societies and their environment in lowland forests.

### 1.3 Study site

We conducted this study in the Compiègne state forest (49°24'54"N, 2°49'23"E, altitude: 31-152 m), which is located in northern France and extends over ca. 14,000 ha at the confluence between the Oise and the Aisne rivers. The climate is sub-oceanic with mean annual temperature and annual rainfall of 10°C and 610 mm, respectively. The forest covers a vast plain and several small mounts (outliers) towards the eastern and southern edges. The geological substrate mainly consists of Paleocene and Eocene sand and limestone, locally covered by quaternary loess or drift sand. The soils are mostly cambisols, luvisols and podzols (FAO classification) and, to a lesser extent waterlogged soils. The current vegetation is a temperate deciduous forest dominated by common beech (*Fagus sylvatica* L.) and oaks (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* L.), with several planted Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands.

Human occupation of the area is evidenced from the Neolithic period onwards (Woimant, 1995). A high density of archaeological sites, mostly in the south half part of the forest, also evidences the extensive Gallo-roman occupation (Figure 44-a), which concentrated nearby streams and along a Roman road (Doyen et al., 2004). These Roman habitats are connected with ancient parcel boundaries as revealed by LiDAR pictures (Horen et al., 2015). During the Roman times, the forest should thus be limited to a few islets on the top of the mounts, whilst the vast majority of the plain was cultivated. Following its abandonment by Gallo-Romans, the plain probably became spontaneously afforested since the fifth century AC (Woimant, 1980).

The forest was first mentioned by Grégoire de Tours in 561 as “forest of Cuise” (Guizot, 1823). Close to the royal *villae* of Compiègne, from the Merovingian period (Hennebicque, 1979, Barbier, 1985), the forest was used for royal hunting and remains as such until recently. The forest continuity is thus attested from the early Middle Ages onwards. Though the forest was used for royal and imperial hunting, grazing by livestock and horses was a common practice of local people. During the 12<sup>th</sup> century these informal practices became use rights, which were preserved until the 17<sup>th</sup> century. Based on written sources, it has been estimated that the livestock pressure within the forest reached more than 7600 pigs and 3800 cattles during the 15<sup>th</sup> century, together with an undetermined number of sheeps (Bocquillon, 2000). In addition, some cultivation rights were also granted and people were allowed to collect firewood and sometimes even trees and shrubs for fences, tools or

carpentries (Bocquillon, 2000). Local users of the forest include villagers, industries such as glass furnaces (Sautai-Dossin, 1973), monasteries, abbeys and hospitals, which were implanted inside or nearby the forest (Figure 44-b). More distant hospitals and abbeys, located along the Oise valley and in Paris, were also allowed to raise their livestock into the forest (Carlier, 1764, Bocquillon, 2000). These use rights were maintained until the Colbertian reformation of 1661, whereby they were drastically reduced; at this time the forest boundaries were the same as today, as revealed by the first map of the forest, drawn in 1662 (*Archives Nationales O/1/3800*). Medieval and early modern writings suggest that the forest was much more open than today. The forest likely remained an open woodland due to the severe climatic conditions of the Little Ice Age (Buridant, 2008) and the many storms that occurred during the 18<sup>th</sup> and early 19<sup>th</sup> centuries. Moreover, game damages were frequently mentioned in the registers of grievances of local populations (Harlé d'Ophove, 1968). A map from 1728 shows that one quarter of the forest consisted of heathlands or marshlands, which were subsequently reforested (Figure 44-c).

Since the late 18<sup>th</sup> century, many plantations occurred over about half of the forest area, leading to a gradual closure of the canopy (Figure 44-d) (Buridant, 2008). These were oak plantations at the beginning, followed by conifer plantations during the 19<sup>th</sup> century. The forest is now managed as a regular high forest of beech and sessile oak. It is currently a closed-canopy forest composed of *Fagus sylvatica* (46%) *Quercus robur* (27%), *Quercus petraea* (7%), *Pinus sylvestris* (7%), other broadleaved (10%) and conifer (3%) species. Since 1970, the American black cherry (*Prunus serotina* Ehrh.) is reported as an invasive tree species, but its first introduction would date back from the mid-19<sup>th</sup> century; it currently occurs in ca. 80% of the forest area, as single trees to pure stands, especially on nutrient-poor soils (Javelle et al. 2011).

## 1.4 Material and methods

### 1.4.1 Site selection

Three sites were selected within closed-canopy forest stands, accounting for contrasted soil types, themselves inherently associated with contrasted historical land uses (Figure 44):

- a podzol located in an area where neither Roman settlement nor agrarian structures were retrieved by field archaeological and LiDAR surveys (Horen et al, 2015). However, glassmaking activities from the 14<sup>th</sup> century using the local sand material were reported nearby (Sautai-Dossin, 1973). In the late 18<sup>th</sup> century, important game damages were described in this site (Buridant, 2008).
- a cambisol located near a major Roman road, but again neither the LiDAR survey nor field archaeological surveys retrieved archaeological artifacts. A former priory was established at ca. 200 m southward during the 10<sup>th</sup> century, as well as few farms established from the 14<sup>th</sup> century until the French revolution (Lambin, 1904, Bocquillon, 2000).
- a luvisol located in an area where Gallo-Roman settlements and agrarian structures were evidenced. From the 12<sup>th</sup> to the 15<sup>th</sup> century, this site was included in a royal hunting reserve, where rabbit warrens were established benefiting from the silty soil texture. A forest survey from 1662 indicated that the forest was locally heavily degraded (*Archives Nationales O/1/3800*).

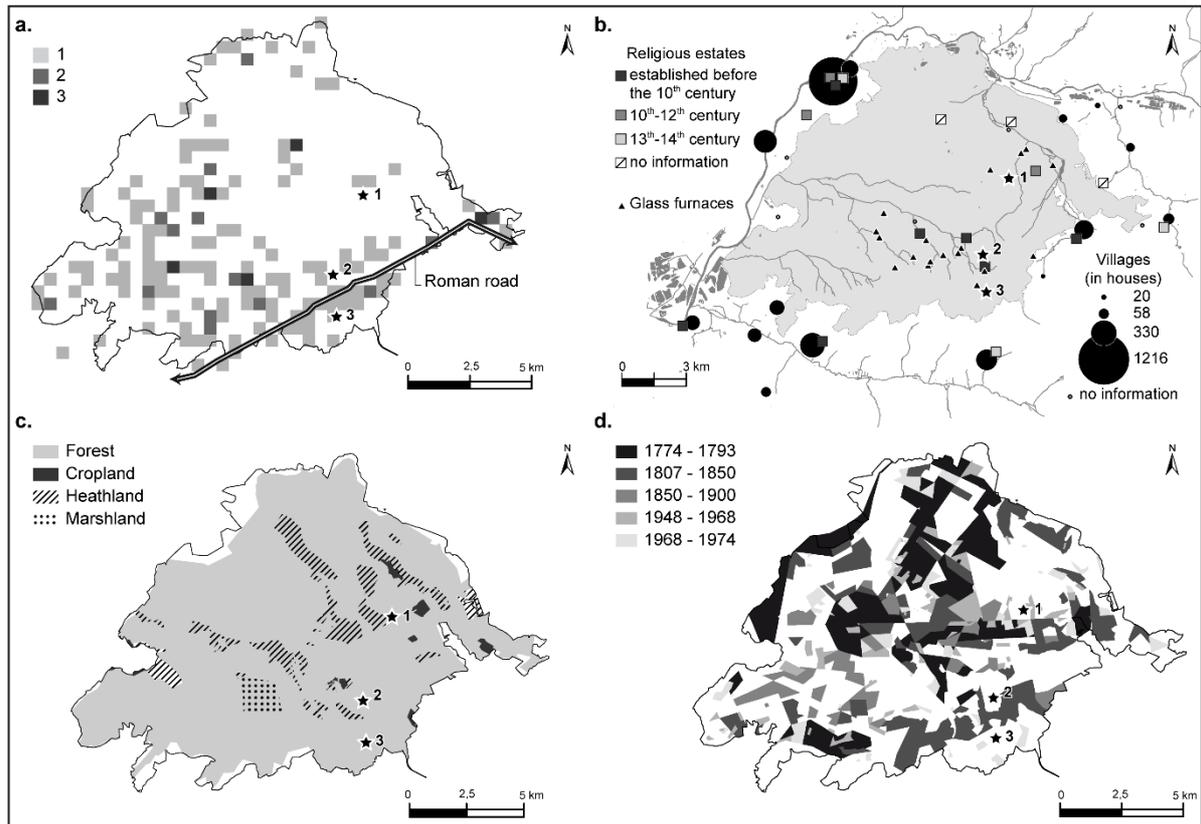


Figure 44 : Maps showing the human impact on the Compiègne forest through historical times..a: frequency of Gallo-Roman sites on a surface of 500m x 500m (after field archaeological data). b: local users' pressure during the Medieval period; permanent villages and religious estates appears as circles and squares, respectively; triangles represent temporary glass furnaces; the pressure from distant users is not shown. c. Land cover in 1728 (after Baillieul, G., 1728. Carte de la forêt de Compiègne et de ses environs, BNF, C&P, GE DD-2987 (861B)). d: tree plantations since the late 18th century (after the archives of the French Office for Forests).

### 1.4.2 Soil sampling

In each of the three sites, we first selected a sufficiently large area within a mature forest stand, with no visible disturbance and no major topographic variation. All woody species occurring within and around the sampled area (ca. 1000 m<sup>2</sup>) were recorded. We then implemented a double sampling strategy (Figure 45):

(i) a soil pit of 1.5 x 1.5m was randomly dug (hereafter: pit sampling). The pit depth depended upon the bedrock depth: 65 cm for the cambisol and 150 cm for the luvisol and podzol. The luvisol was further investigated to 2,5 m depth using an auger to reach the calcareous loess and get the full picture of the soil profile. On each side of the pit, each horizon of the soil profile was described with respect of thickness, texture and structure, percentage and size of roots, presence of stones. We subsequently sampled each soil horizon, with two samples per horizon for the thicker ones: five one-liter soil samples were extracted, starting from the bottom of the pit to avoid contamination (Carcaillet and Thinon, 1996). Five (5, 16, 37, 58 and 83 cm depth), four (5, 15, 30 and 45 cm depth) and five (5, 20, 35, 50 and 70 cm depth) levels were sampled for the podzol, cambisol and luvisol, respectively. Each sample was labeled according to its position.

(ii) a 1000 m<sup>2</sup> grid comprising thirty nodes was centered on the pit (hereafter: auger sampling). At each node, a one-liter core soil sample was extracted using an auger collecting the first 20 cm of the topsoil. The nodes were distant of 5 and 10 meters from each other along X and Y axis, respectively. Each sample was labeled according to its XY coordinates.

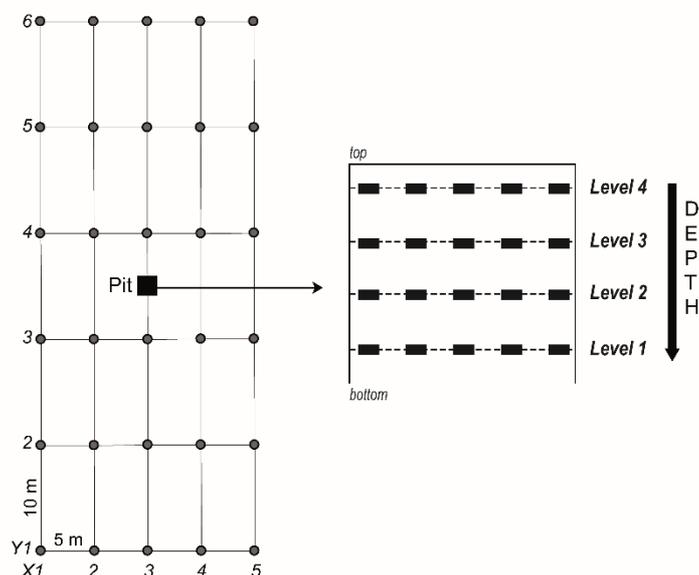


Figure 45 : Sampling design. On the left: the 20 x 50 m grid centered on the soil pit, with the 30 georeferenced (X-Y) nodes at which an auger sample was taken. On the right: vertical profile of the soil within the pit, with the 5 samples per level (horizontal dashed line) at four depths per pit side.

### 1.4.3 Charcoal extraction and identification

All soil samples were transported to the lab within 24h and subsequently air-dried for 48h, weighed (kg) and placed in a water bath for 48h together with a defloculant agent ((NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>) and mixed into a rotary tank to break micro-aggregates. The mixed material was subsequently spread on a series of three sieves, with 3.9, 1.9 and 0.8 mm mesh sizes for manual extraction of charcoals. We deleted charcoal fragments smaller than 0.8 mm, which were too small to allow taxonomic identification.

The extraction of charcoals was done for all samples of the auger sampling, but for a restricted number of samples of the pit sampling, depending on charcoal richness: 20 liters per horizon for the cambisol and podzol, which were the soils with the lowest amount of charcoals; 12 liters for the luvisol (3 liters per side).

The taxonomic identification of charcoals was based on the wood anatomical features and carried out using a reflected light microscope (x100, x200, x500) (Leica® dm 2500), wood anatomical atlases (Schweingruber, 1990a, 1990b), and a reference collection of carbonized wood from the lab. The transverse, radial and tangential anatomic planes of each charcoal were observed to identify charcoals at the finest taxonomic level as possible, usually species or genus, rarely subfamily (Maloideae) or family (Rosaceae).

The specific anthracomass (SA), which reflects the soil charcoal richness (Carcaillet and Thinon, 1996, Talon, 2010), was obtained by dividing the mass of extracted charcoals by the total mass of the soil sample, once elements coarser than 3,9 mm removed. The specific

anthracomass per taxon (SAT in mg kg<sup>-1</sup>) was also calculated. We also calculated the number of occurrences of each taxon as the number of samples containing the taxon, irrespective to their anthracomass.

#### 1.4.4 Radiocarbon dating

Fifteen identified charcoals from the three soil pits were dated by Accelerator Mass Spectrometry <sup>14</sup>C. They were selected at the different soil depths. *Betula sp.* L. and *Rhamnus cathartica* L. were chosen as short-living pioneer, light-demanding species, together with *Fagus sylvatica* as a late-successional, shade-tolerant species. AMS <sup>14</sup>C was carried out by the Poznan Radiocarbon Laboratory (Poland). Dates were calibrated in *Anno Domini* (A.D.) with a 2σ confidence interval, using the Oxcal 4.2 program (Ramsey and Lee, 2013) based on the data set Intcal13 (Reimer et al., 2013).

### 1.5 Results

#### 1.5.1. Soils and current vegetation

The podzol was developed on Quaternary sandy deposits and included a paleosol covered by a 30 cm-thick layer of wind-blown sand. The paleosol exhibited a typical sequence of A/E/Bh/Bs/C horizons, with an ortsteinic illuvial horizon. The A/E transition showed numerous fossilized galleries of dung beetles. The forest vegetation consisted of a tree canopy dominated by oaks (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) and common beech (*Fagus sylvatica*), with holly (*Ilex aquifolium* L.), hornbeam (*Carpinus betulus* L.) and the invasive American black cherry (*Prunus serotina*) in the understory.

The cambisol was developed on a limestone bedrock located at 65 cm depth and showed a sandy-loam to sandy-clay texture. The common beech dominated the canopy, with scattered individuals of hornbeam and ash (*Fraxinus excelsior* L.), and ivy (*Hedera helix* L.) creeping on the ground and climbing to the trees.

The loessic luvisol exhibited a typical sequence of A/E/Bt/C/Ck horizons. The vegetation was dominated by common beech and hornbeam, with sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.), wild cherry (*Prunus avium* L.) and holly as secondary species.

#### 1.5.2 Soil charcoal assemblages

A total of 486 kg of soil were sampled from the three sites, which returned ca. 19,5 g of charcoal following extraction, corresponding to 4515 charcoal pieces, of which 70% were taxonomically identified; the remaining 30% were either glazed or too altered to allow identification, and were classed as angiosperm, gymnosperm or not determined. Whilst 75% of the charcoals coming from the podzol and the luvisol could be identified, this proportion fell to 57% for the cambisol. We identified 13, 12 and 9 taxa from the podzol, the cambisol and the luvisol, respectively. All sites together, we identified 16 taxa that could be classified as shade-tolerant, late-successional, shade-intolerant, mid-successional, and light-demanding, early-successional species (Tableau 14). Though charcoal assemblages were dominated by the shade-tolerant, late successional species *Fagus* on cambisol and luvisol (but by *Quercus* on podzol), light-demanding taxa were found at 10 to 35% of the sample points, over one quarter (podzol and cambisol) to three quarters (luvisol) of the sampled area (Figure 46). We found more taxa with the pit than the auger sampling, irrespective to

the site considered, but the auger sampling retrieved additional taxa compared to the pit sampling for the podzol and cambisol. All sites together, *Fagus* exhibited both the highest frequency and the greatest SAT; then came, by order, *Quercus*, *Betula*, *Carpinus*, *Corylus* and *Populus*. As rare taxa, we also found *Ilex*, *Acer*, *Prunus*, *Ulmus*, *Viburnum*, *Pinus*, *Rhamnus*, *Fraxinus*, *Maloideae* and *Rosaceae*.

Tableau 14 : Specific anthracomass per taxon (SAT) and number of occurrences (occ; the maximal value, i.e. the total number of sampling points, is given in brackets) across the three soil types for the two sampling designs.

taxon	SAT	podzol		cambisol			luvisol					
		auger occ (max=30)	pit occ (max= 100)	SAT	auger occ (max=30)	SAT	pit occ (max =80)	SAT	auger occ (max=30)	SAT	pit occ (max= 62)	
<b>Late-successional</b>												
<i>Fagus</i>	7,3	6	2,2	28	31,8	24	4,8	46	68	25	9,7	40
<i>Ilex</i>	-	-	0,2	8	0,1	1	<0,1	1	-	-	-	-
<b>Mid-successional</b>												
<i>Quercus</i>	77,7	22	10,2	45	2,2	13	1	37	-	-	0,1	3
<i>Carpinus</i>	0,6	4	-	-	-	-	-	-	12,5	17	7,6	36
<i>Acer</i>	3,1	2	-	-	0,3	1	-	-	-	-	-	-
<i>Corylus</i>	0,3	1	<0,1	1	-	-	0,4	13	18,9	6	0,8	14
<i>Prunus</i>	0,2	1	<0,1	1	-	-	<0,1	2	-	-	-	-
<i>Fraxinus</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,1	2
<i>Ulmus</i>	-	-	0,1	2	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Early-successional</b>												
<i>Populus</i>	0,5	2	0,1	4	0,1	1	<0,1	2	14,5	9	2,4	32
<i>Pomoideae</i>	-	-	0,2	1	0,2	1	0,1	2	0,9	1	0,2	2
<i>Rosaceae</i>	-	-	-	-	0,1	1	-	-	-	-	-	-
<i>Betula</i>	-	-	13,6	46	<0,1	1	2,9	40	3	3	0,3	11
<i>Viburnum</i>	-	-	0,2	2	-	-	<0,1	1	-	-	-	-
<i>Pinus</i>	-	-	<0,1	1	-	-	-	-	-	-	<0,1	1
<i>Rhamnus</i>	-	-	-	-	-	-	1,1	13	-	-	-	-
<b>total number of taxa</b>		<b>7</b>		<b>11</b>		<b>8</b>		<b>10</b>		<b>6</b>		<b>9</b>

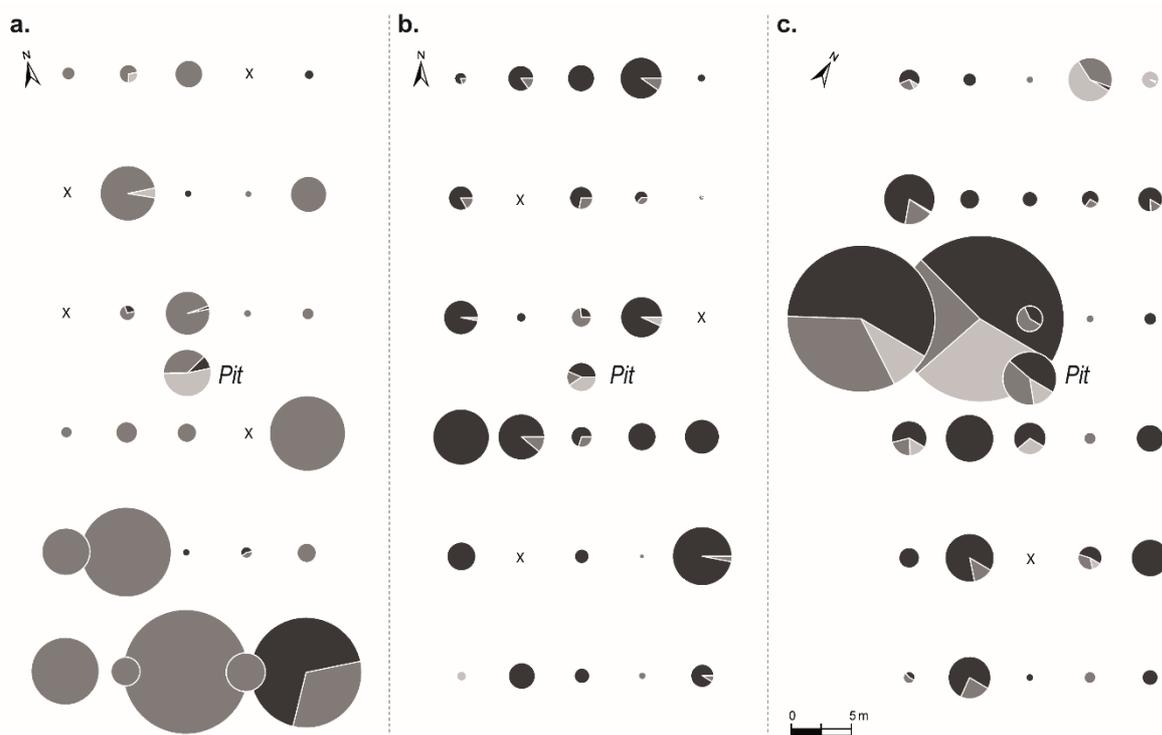


Figure 46 : Spatial distribution of total specific anthracomass (SA) values split according to the successional status of corresponding taxa, for the podzol (a), cambisol (b) and luvisol (c). Light grey: light-demanding, early-successional; dark grey: shade intolerant, mid-successional; black: shade-tolerant, late-successional. The circles size illustrated the specific anthracomass. The diameter of the pie chart is proportional to the SA value (maximal value = 1707.7 mg.kg<sup>-1</sup>). A cross indicates no charcoal retrieved at this node. The central pie chart gives the results for the pit sampling.

The anthracological diagrams of pits showed similar SA vertical patterns across sites with a low value in the first level compared to the second and third ones (Figure 47). Deeper levels contained fewer charcoals and taxa. The number of fragments did not correlate with the anthracomass, indicating that the weight of charcoals is highly variable among taxa and depths (see also Appendix 1 and Appendix 2). The comparison between the total mass and total number of fragments revealed a decrease of fragment weight with depth.

The **podzol** showed few differences of taxa distribution in the three upper levels despite the fact that two of them corresponded to the recent sandy soil while the third one was the A horizon of the paleosol. *Quercus* and *Betula* dominated the charcoal assemblage and were present in almost half of the samples (Tableau 14), followed by *Fagus*. Surprisingly, while *Quercus* still dominated auger samples (present at 22 nodes of the grid), *Betula* was not retrieved (Figure 48). Considering together pit and auger samples, other taxa were found between eight (*Ilex*) and one pieces (*Pinus* or *Maloideae*).

In the **cambisol**, *Fagus* was the most frequent taxon irrespective to the sampling method, followed by *Quercus* and *Betula*. *Corylus* and *Rhamnus* were present in 13 samples and other taxa were poorly represented. The vertical distribution of SAT evidenced slightly different trends according to their depth. *Fagus* decreased with depth, whilst *Quercus* and *Betula* showed a peak in the third level. However, the five most common taxa were always observed in the three upper levels.

In the **luvisol**, few differences of taxa distribution were retrieved in the three upper levels. *Fagus* was dominant across all samples, followed by *Carpinus*, *Populus* and *Corylus*. Five other taxa were weakly represented. The auger sampling returned a high density of charcoals at two neighboring points for most taxa.

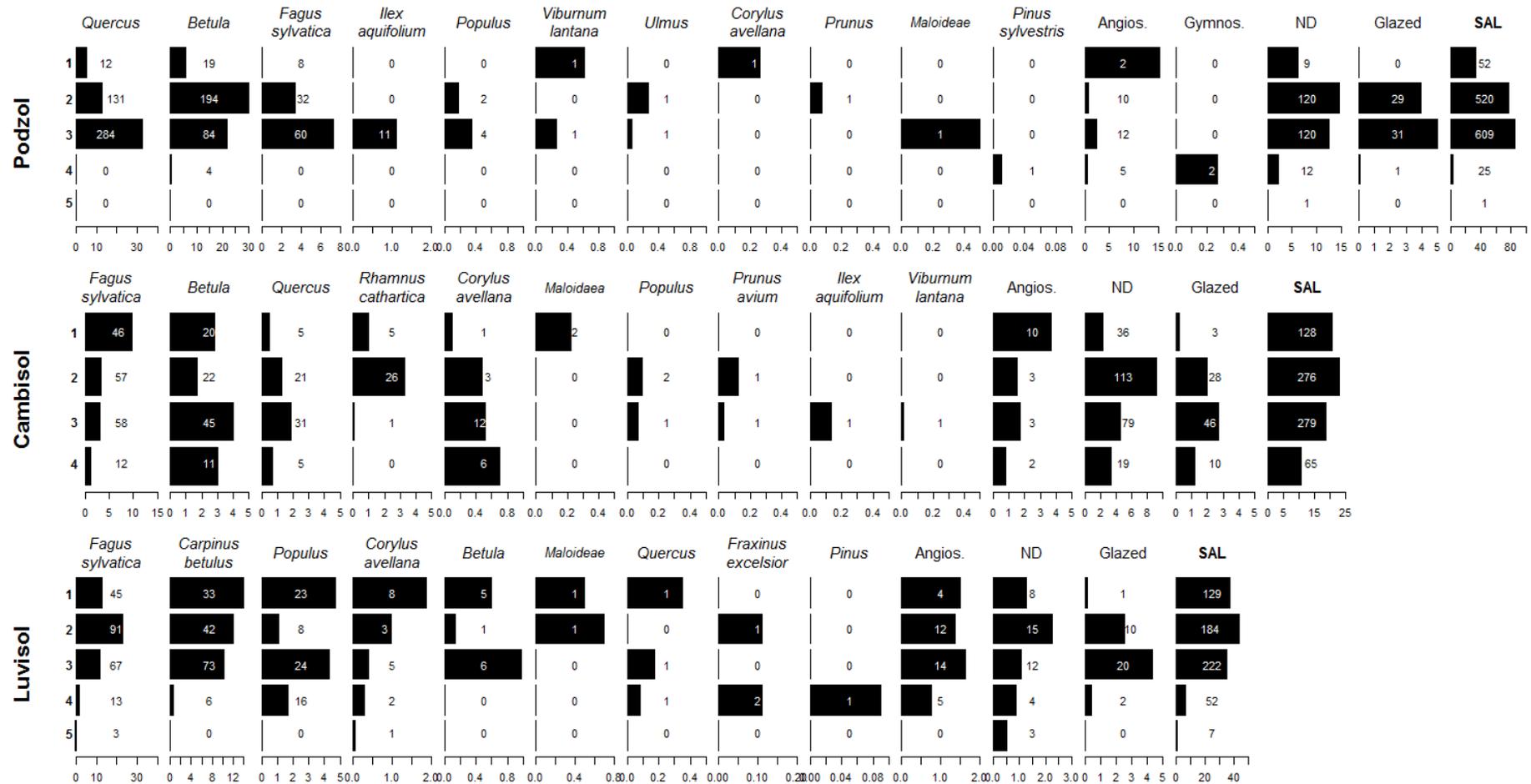


Figure 47 : Anthracological diagrams for the pits of podzol, cambisol and luvisol. The Xaxis gives the weight per taxon (mg.kg-1); the Y-axis ranks the sampling levels, numbered from top to bottom. Each column corresponds to a taxon. Taxa are ordered according to their abundance (in weight) from the left to the right, followed by fuzzy taxa (Angios: Angiosperms, Gymnos: Gymnosperms), unidentified taxa (ND: not determined, Glazed: Glazed charcoals) and the cumulated anthracomass per level (SAL). The corresponding number of charcoals per level and per taxon is reported for each bar.

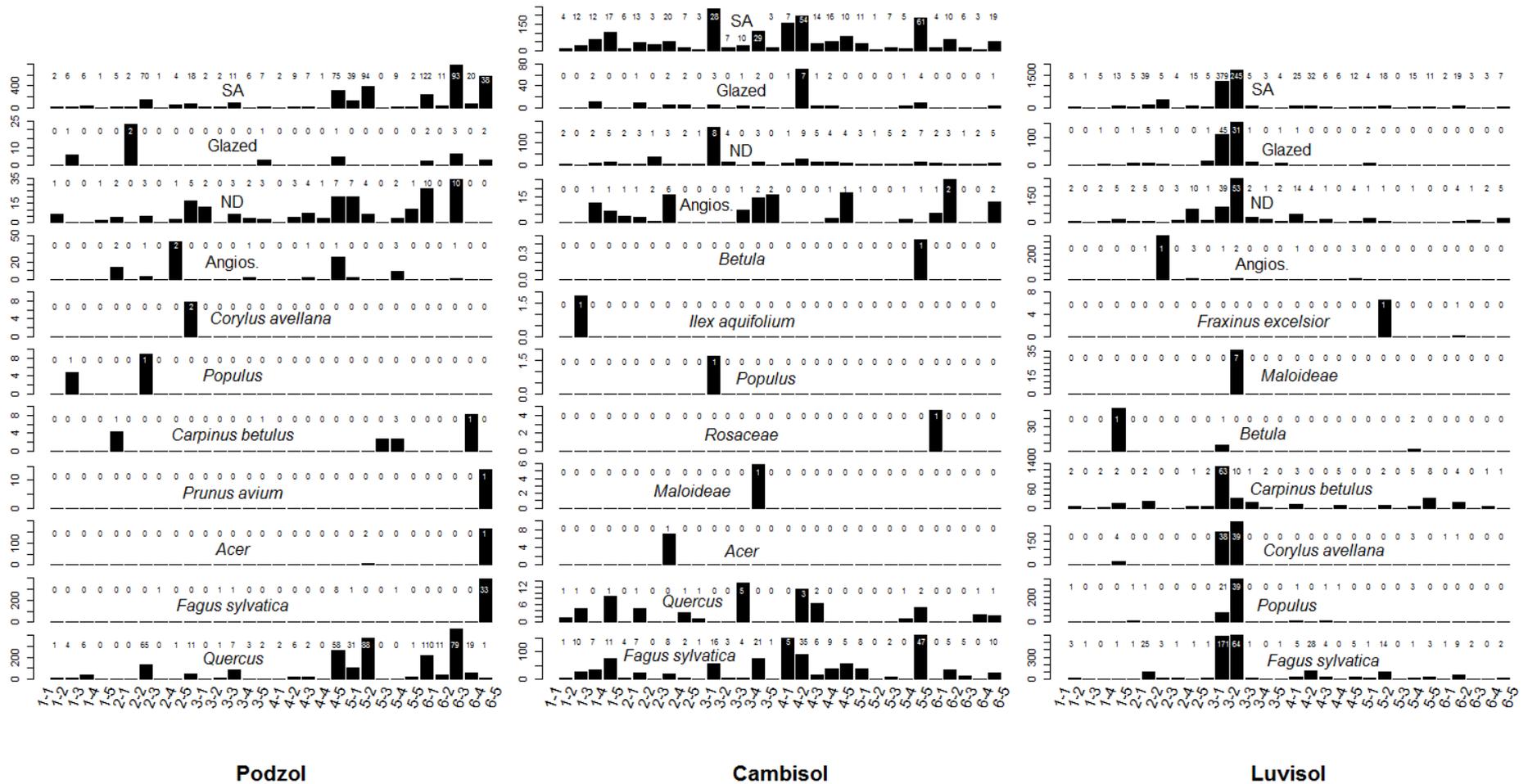


Figure 48 : Anthracological diagrams (mg.kg<sup>-1</sup>) from the auger sampling of the podzol, cambisol and luvisol. The X-axis gives the X-Y coordinates of the samples (see Figure 45); the Y-axis gives the weight per taxon (mg.kg<sup>-1</sup>). Each line corresponds to a taxon. Taxa are ordered according to their abundance (in weight) from the bottom to the top, followed by fuzzy taxa (Angios: Angiosperms, Gymnos: Gymnosperms), unidentified taxa (ND: not determined, Glazed: Glazed charcoals) and the cumulated anthracomass (SA). The corresponding number of charcoals per node and per taxon is reported over each bar

### 1.5.3 <sup>14</sup>C datation

None of the 15 dated charcoals was older than the 10<sup>th</sup> century (Tableau 15). The three pieces of *Betula* were the oldest, dating back from the 10<sup>th</sup> to the 12<sup>th</sup> century, irrespective to sampling site and depth. The 11 pieces of *Fagus* exhibited a wide range of ages, irrespective to sampling depth; they were older in the cambisol (from late 13<sup>th</sup> to early 17<sup>th</sup> century) than in the podzol (from 15<sup>th</sup> to middle 17<sup>th</sup> century) and luvisol (from 15<sup>th</sup> century to today). The age of the piece of *Rhamnus* from the cambisol was poorly constrained (16<sup>th</sup> century to today).

Tableau 15 : AMS-14C dates of the 15 charcoals. Radiocarbon dates calibrated in AD, at 2 $\sigma$  confidence interval, based on the IntCal13 dataset (Reimer et al., 2013).

Site	Depth (cm)	Species	Age BP	Age cal. AD (2 $\sigma$ )
<b>Podzol</b>	37	<i>Fagus sylvatica</i>	320 $\pm$ 30	1483-1646
	16	<i>Betula</i>	1075 $\pm$ 30	894-1020
	16	<i>Fagus sylvatica</i>	405 $\pm$ 30	1433-1624
	5	<i>Betula</i>	1050 $\pm$ 30	900-1027
	5	<i>Fagus sylvatica</i>	360 $\pm$ 30	1450-1635
<b>Cambisol</b>	45	<i>Fagus sylvatica</i>	585 $\pm$ 30	1299-1415
	30	<i>Betula</i>	970 $\pm$ 30	1016-1155
	30	<i>Fagus sylvatica</i>	425 $\pm$ 35	1418-1620
	16	<i>Fagus sylvatica</i>	675 $\pm$ 30	1271-1391
	16	<i>Rhamnus cathartica</i>	235 $\pm$ 30	Posterior to 1528
	5	<i>Fagus sylvatica</i>	470 $\pm$ 40	1330-1609
<b>Luvisol</b>	50	<i>Fagus sylvatica</i>	210 $\pm$ 30	Posterior to 1646
	35	<i>Fagus sylvatica</i>	270 $\pm$ 30	1514-1799
	20	<i>Fagus sylvatica</i>	170 $\pm$ 30	Posterior to 1659
	5	<i>Fagus sylvatica</i>	435 $\pm$ 30	1418-1614

## 1.6 Discussion

### A double sampling method better captures local charcoal assemblages

The pit sampling retrieved a greater number of taxa than the auger sampling. Except *Pinus*, which was only present in the deepest horizons of the podzol and luvisol, all species were found in the three upper sampling levels, thus within ca. the 35 first centimeters. Consistent with previous studies (Carcaillet, 2001, Carcaillet and Thinon, 1996, Touflan et al., 2010), we found no relationship between the charcoal vertical distribution and the time at which fires occurred. This reflects soil mixing under the influence of the belowground biological activity (Hole, 1981) and explains the homogeneity of charcoal assemblages within upper soil layers, irrespective to the site considered.

The addition of an auger sampling to the traditional pit sampling highlights two advantages. Firstly, it allows retrieving taxa that were missing from the pit. For example, two more taxa were found in the podzol (*Carpinus*, *Acer*) and cambisol (*Acer*, *Rosaceae*) sites. Secondly, it better captures the spatial variability of charcoal assemblages, hence better accounts for the representativeness of charcoal assemblages at the stand scale, compared to pit sampling. For example, in the podzol, *Betula* exhibited the greatest frequency and SAT for the pit, whilst it was not retrieved with the auger sampling; this suggests that the 301 charcoals of *Betula* found in the pit could originate from a single tree or from a local anthropogenic wood fire. We thus conclude that combining pit sampling together with auger sampling gives a better pedoanthracological picture of past forest communities, and may -at least partly- overcome the classical bias associated with the spatial heterogeneity of charcoal deposits (Ohlson and Tryterud, 2000).

### **Soil charcoal assemblages as proxies for past landscapes**

Our results evidence a vertical mixing of charcoal assemblages, which is likely due to the biological activity of soil. As a result, the soil charcoal picture hardly reflects temporal changes in forest stand composition. Moreover, combustion processes induces a distortion in anthracological diagrams due to highly variable ratios between the volume of burnt wood and the mass and number of produced charcoals (Chabal, 1994, Théry-Parisot et al., 2010, Chrzavzez, 2013). Experimental studies indeed suggest that not only the physiological features of the woody species can influence its charcoalification rate (Rossen and Olson, 1985, Fréjaville et al., 2013), but also the heating conditions (Braadbaart and Poole, 2008) as well as local environmental conditions (Théry-Parisot et al., 2009). Thus, the number and weight of charcoals hardly reflect the original quantity of burnt wood, but their representation and frequencies depend upon the available biomass represented by each taxa in the forest stand. Hence, their occurrence and frequency as retrieved from the auger sampling provide valuable information within the framework of historical ecology. Seven of the 16 identified taxa were light-demanding, early-successional taxa that were missing from the current vegetation, indicating a more open environment than today, especially on the luvisol. Although their occurrences were small to moderate, these light-demanding taxa were present over a large part of the sampled area, suggesting that the forest canopy used to be more open than today. Conversely, among the species currently abundant in the study sites but missing from (or rare in) the soil charcoal assemblages, all are either rather shade-tolerant species (*Ilex aquifolium* and *Acer pseudoplatanus* on luvisol, *Carpinus betulus* on podzol and cambisol, *Hedera helix* on cambisol) or grazing-intolerant species (*Fraxinus excelsior* on cambisol, *Prunus avium* on luvisol).

### **Pedoanthracology as a support for archaeological and historical data**

Field archaeological surveys and LiDAR images found no evidence for the presence of a forest in the studied stands during the Roman times (Horen et al., 2015). Here we found further support for this scenario since none of the dated charcoals was older than the 10<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> century. Of course we should cautiously interpret this result due to the relatively long lifespan of *Fagus* (ca. 150-200 yrs). However, the age difference between *Fagus* and *Betula* was sufficiently important to consider *Betula* was firstly present on the podzol, but not on the cambisol. The fact that the oldest charcoals were pieces of *Betula* from the podzol and

cambisol supports the hypothesis that the medieval forest, which is mentioned for the first time at the 6<sup>th</sup> century, was an open-canopy forest with a substantial proportion of shade-intolerant tree species. Many European forests are considered to have been rather oak-savanna-like woody pastures than true forests up to the end of Middle Ages, due to the heavy grazing pressure by livestock, which destroyed the seedling of the trees (Rackham, 1998, Dirks, 1998, Vera, 2000). In Compiègne forest, this is consistent with the big livestock holdings of farmers and religious estates that were reported to graze in the understories (Bocquillon, 2000), and the intensive wood collection by glassmakers (Sautai-Dossin, 1973) for the cambisol and podzol. The abundance of dung beetle galleries observed in the podzol profile suggests local soil enrichment associated to a pasture land use, and thus a rather open landscape. Consistently, the sand layer observed over the paleosol may be a consequence of intensive grazing on sandy soils and subsequent drift-sands (Spek, 1998). Unfortunately, the biological mixing renders impossible the dating of the buried soil from charcoals.

The plot with luvisol was in a royal hunting reserve where no use-right was granted, the presence of rabbits, attested by fossilized warrens that were active until the 15<sup>th</sup> century, may have impeded the forest regeneration and maintained open areas. Most radiocarbon-dated pieces of *Fagus* originated from the 15<sup>th</sup> century onwards, except on the cambisol where pieces from the late 13<sup>th</sup> were retrieved. This suggests a trend towards forest maturation and canopy closure at this time. This coincides with the dark period of the Middle ages (14<sup>th</sup> century), when the Hundred Years War, famines and the plague epidemics led to a strong population decline in north France and release the forest from human pressure (Gottfried, 1983, Bardet and Dupâquier, 1997). Since the forest inventory of 1662 reported strongly damaged stands on the luvisol area (*Archives Nationales O/1/3800*) and important game damages were reported in the late 18<sup>th</sup> century (Buridant, 2008), it is likely that *Fagus* could locally coexist with light-demanding species. Since the end of the 18<sup>th</sup> century, the forestry policies promote a gradual closing of the forest, consistent with the dominance of *Fagus* in the most recent charcoal assemblages, as well as in current forest stands. Interestingly, the exotic *Prunus serotina*, which is currently very abundant in the podzol site, was not retrieved in charcoal assemblages, consistent with the recent invasion scenario (second half of the 20<sup>th</sup> century; Javelle et al., 2011).

## 1.7 Conclusion

In this study we questioned whether pedoanthracology combined with historical and archaeological data can give coherent and complementary information to reconstruct the historical ecology of forests. Our case study, which is representative of many European lowland forests, reveals that the vertical patterns of soil charcoal assemblages cannot be taken as a proxy for forest succession over time, as a probable consequence of soil bioturbation. In contrast, horizontal patterns are likely better preserved; hence, maximizing the sampling effort over the topsoil surface using an auger sampling design like ours may give a fuller picture of local species assemblages and more readily reflect past forest communities.

Despite many taphonomic biases and the impossibility to resolve the temporal sequence of vegetation changes, we demonstrated that pedoanthracology can give support to scenario

or hypotheses made from archaeological and historical data. As an illustration, soil charcoal assemblages retrieved in the three sites of the Compiègne forest provide further support to the scenario derived from historical records, field archaeological data and LiDAR images, suggesting that (i) the area likely became spontaneously afforested during the early Middle Ages, probably from the 5th century onwards; (ii) a oak savanna-like ecosystem was present through the Middle Ages as a consequence of heavy grazing by wild (hunting reserve) and domestic (elsewhere) animals, like in many European lowland forests (Kirby and Watkins, 1998); (iii) a subsequent progressive canopy closure occurred, with the establishment of a closed-canopy beech forest in the late 18<sup>th</sup> century; (v) the invasion by *Prunus serotina* is a recent trend which is not yet reflected by charcoal assemblages.

We conclude that pedoanthracology can help to understand the past relationships between human societies and forest but suffers from two main limitations. First, the representativeness of charcoal assemblages increases with the sampled area, but since charcoal sorting and identification are very time-consuming, only a limited number of samples can usually be analyzed. Second, the accuracy of past succession reconstructions increases with the number of dated charcoals, but since <sup>14</sup>C dating is very costly, only a limited number of charcoals can usually be dated. Designing a sound sampling strategy is thus crucial to maximize the benefits of pedoanthracology in historical ecology studies.

### 1.8 Acknowledgments

We would like to thank Roger Langhor for his expertise on forest soil; Claire Dehlon and Marie-Claude Bal-Serin for their help in the taxonomic identification of charcoals; the two anonymous referees for their helpful comments on the initial manuscript. We are also grateful to the National Forestry Office for facilitations during fieldwork. This work has been conducted while TF was supported by a PhD grant from the French “Ministère de l’Enseignement et de la Recherche”.

### 1.9 References

- Agache, R. (1979). Nouveaux apports des prospections aériennes en archéologie préromaine et romaine de la Picardie. Résultats archéologiques. *Cahiers archéologiques de Picardie*, **6**, 33–90.
- Barbier, J. (1985). Domaines royaux de la région de Compiègne (VIe-Xe siècles). Les fiscaux des palais mérovingiens et carolingiens. *Bulletin de la société historique de Compiègne*, **B29**, 9–31.
- Bardet, J.P. & Dupâquier, J. (1997). Histoire des populations de l’Europe, tome 1 Des origines aux prémices de la révolution démographique. Fayard, Paris.
- Bocquillon, A.M. (2000). Le roi dans ses forêts de Cuise, Laigue, Retz du XIIIe au XVe siècle. Université de Paris I Panthéon – Sorbonne, Paris.
- Boucher, Y., Arseneault, D., Sirois, L. & Blais, L. (2009). Logging pattern and landscape changes over the last century at the boreal and deciduous forest transition in Eastern Canada. *Landscape Ecology*, **24**, 171–184.
- Braadbaart, F. & Poole, I. (2008). Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts. *Journal of Archaeological Science*, **35**, 2434–2445.
- Brun, C. (2011). Anthropogenic indicators in pollen diagrams in eastern France: a critical

- review. *Vegetation history and Archaeobotany*, **20**, 135–142.
- Buridant, J. (2008). Le premier choc énergétique : la crise forestière dans le nord du Bassin Parisien, début XVIIIe – début XIXe siècle. Université de Paris IV – Sorbonne, Paris.
- Carcaillet, C. (2001). Soil particles reworking evidences by AMS 14 C dating of charcoal. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, **332**, 21–28.
- Carcaillet, C. & Thion, M. (1996). Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **91**, 399–416.
- Carlier, C. (1764). Histoire du duché de Valois, tome premier. Guillyn Libraire-imprimeur du Roi, Paris.
- Chabal, L. (1994). Apports récents de l'antracologie à la connaissance des paysages passés : performances et limites. *Histoire et Mesure*, **9 (3-4)**, 317–338.
- Chrzavzez, J. (2013). Approche expérimentale de la conservation des charbons de bois dans les gisements paléolithiques : processus post-dépositionnels, fragmentation et représentativité des assemblages anthracologiques. Université Sophia Antipolis, Nice.
- Dahlström, A. (2008). Grazing dynamics at different spatial and temporal scales: examples from the Swedish historical record A.D. 1620-1850. *Vegetation History and Archaeobotany*, **17**, 563–572.
- Dambrine, E., Dupouey, J.L., Laüt, L., Humbert, L., Thion, M., Beauvils, T. & Richard, H. (2007). Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture. *Ecology*, **88**, 1430–1439.
- Dirkx, G.H.P. (1998). Wood-pasture in Dutch Common woodlands and the deforestation of the Dutch landscape. In Kirby, K.J., Watkins, C., (Eds.), *The ecological history of European forests*. Cab international, Wallingford, 53–62.
- Doyen, B., Decocq, G. & Thuillier, P. (2004). Archéologie des milieux boisés en Picardie. *Revue archéologique de Picardie*, **1**, 149–164.
- Edwards, K.J. & MacDonald, G.M. (1991). Holocene palynology: II human influence and vegetation change. *Progress in Physical Geography*, **15 (4)**, 364–391.
- Egan, D. & Howell, E.A. (2001). *The Historical Ecology Handbook*. Island Press, Washington, DC, USA.
- Elias, S. (2007). *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), Amsterdam.
- Fesenmyer, K.A. & Christensen Jr., J.L. (2010). Reconstructing Holocene fire history in a southern Appalachian forest using soil charcoal. *Ecology*, **91**, 662–670.
- Fraterrigo, J.M., Balsler, T.C. & Turner, M.G. (2006). Microbial community variation and its relationship with nitrogen mineralization in historically altered forests. *Ecology*, **87**, 570–579.
- Fréjaville, T., Carcaillet, C. & Curt, T. (2013). Calibration of charcoal production from trees biomass for soil charcoal analyses in subalpine ecosystems. *Quaternary International*, **289**, 16–23.
- Georges-Leroy, M., Bock, J., Dambrine, E. & Dupouey, J.L. (2011). Apport du lidar à la connaissance de l'histoire de l'occupation du sol en forêt de Haye. *Archeosciences*, **35**, 117–129.
- Gimmi, U. & Bürgi, M. (2007). Using oral history and forest management plans to reconstruct traditional non-timber forest uses in the Swiss Rhone valley (Valais) since the late

- nineteenth Century. *Environment and History*, **13**, 211–246.
- Gottfried, R. (1983). *The black death: natural and human disaster in medieval Europe*. Free Press, New York.
- Guizot, F.M. (1823). *Collection des mémoires relatifs à l'histoire de France depuis la fondation de la monarchie française jusqu'au 13e siècle*. J.L.J. Brière Ed., Paris.
- Harlé d'Ophove M. (1968). *Une forêt des chasses royales : la forêt de Compiègne de la réformation de Colbert à la révolution*. Société historique de Compiègne, Compiègne.
- Hennebicque, R. (1979). Espaces sauvages et chasses royales dans le Nord de la France, VIIème-IX ème siècles. Actes des congrès de la Société des historiens médiévistes de l'enseignement supérieur public. *Revue du Nord*, **10**, 35–57.
- Hole, F.D. (1981). Effects of animals on soil. *Geoderma*, **25**, 75–112.
- Horen, H., Buridant, J., Gallet-Moron, E., Brasseur, B., Feiss, T., Héraude, M., Rassat, S., Montoya, C. & Burban-Col, V. (2015). Relation entre les structures archéologiques identifiées sur un levé LiDAR et la typologie des sols du massif forestier de Compiègne (Nord de la France). *Revue du Nord Hors-série Collection Art et Archéologie*, **23**, 85–94.
- Javelle, A., Kalaora, B. & Decocq, G. (2011). A view from continental Europe: the case-study of *Prunus serotina* in France, in I. Rotherham and R. Lambert (Eds), *Invasive and introduced plants and animals: human perceptions, attitudes and approaches to management*, Routledge, New York, 277–288.
- Kirby, K.J. & Watkins, C. (1998). *The ecological history of European forests*. CABI Publishing, Wallingford.
- Kraus, K. & Pfeifer, N. (1998). Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **53**, 193–203.
- Lambin, P. (1904). *Monographie de Saint-Nicolas de Courson : forêt de Compiègne*. Société historique de Compiègne, Compiègne.
- Lavrieux, M., Bréheret, J.G., Disnar, J.R., Jacob, J., LeMilbeau, C. & Zocatelli, R. (2012). Preservation of an ancient grassland biomarker signature in a forest soil from the French Massif Central. *Organic Geochemistry*, **51**, 1–10.
- Miller, M.E. (1999). Use of historic aerial photography to study vegetation change in the negrito creek watershed, southwestern New Mexico. *The Southwestern Naturalist*, **44 (2)**, 121–137.
- Nielsen, A.B., Odgaard, B.V., 2004. The use of historical analogues for interpreting fossil pollen records. *Vegetation History and Archaeobotany* **13**, 33–43.
- Ohlson, M. & Tryterud, E. (2000). Interpretation of the charcoal record in forest soils: forest fires and their production and deposition of macroscopic charcoal. *Holocene*, **10**, 519–525.
- Petit, C.C. & Lambin, E.F. (2002). Long-term land-cover changes in the Belgian Ardennes (1775-1929): model-based reconstruction vs. historical maps. *Global Change Biology*, **8**, 616–630.
- Plue, J., Hermy, M., Verheyen, K., Thuillier, P., Saguez, R. & Decocq, G. (2008). Persistent changes in forest vegetation and seed bank 1,600 years after human occupation. *Landscape Ecology*, **23**, 673–688.
- Rackham, O. (1998). Savanna in Europe. In Kirby, K.J., Watkins, C., (Eds.), *The ecological history of European forests*. CABI Publishing, Wallingford, 1–24.
- Ramsey, C.B. & Lee, S. (2013). Recent and planned developments of the program OxCal.

- Radiocarbon*, **55**, 720–730.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, L., Freidrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hafliadason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R.W., Richards, D.A., Scott, E., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M. & Van der Plicht, J. (2013). IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **55**, 1869–1887.
- Ritchie, J.C. (1995). Current trends in studies of long-term plant community dynamics. *New Phytol*, **130**, 469–494.
- Robin, V., Talon, B. & Nelle, O. (2015). Charcoal: Resource and ubiquitous proxy. *Quaternary International*, **366**, 1–2.
- Rossen, J. & Olson, J. (1985). The controlled carbonization and archaeological analysis of SE U.S. wood charcoals. *Journal of Field Archaeology*, **12** (4), 445–456.
- Sautai-Dossin, A.V. (1973). Premières recherches sur les verreries en forêt de Compiègne. *Revue archéologique de l'Oise*, **4**, 59–65.
- Schwartz, D., Thinon, M., Goepp, S., Schmitt, C., Casner, J., Rosique, T., Wuscher, P., Alexandre, A., Dambrine, E., Martin, C. & Guillet, B. (2005). Premières datations directes de défrichements protohistoriques sur les chaumes secondaires des Vosges (Rossberg, Haut-Rhin). Approche pédoanthracologique. *Compte rendus Géosciences*, **337**, 1250–1256.
- Schlumbaum, A., Tensen, M. & Jaenicke-Després, V. (2008). Ancient plant DNA in archaeobotany. *Vegetation History and Archaeobotany*, **17**, 233–244.
- Schweingruber, F.H. (1990a). Anatomy of European Woods. Bern, Stuttgart.
- Schweingruber, F.H. (1990b). Microscopic Wood Anatomy. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf.
- Song, D.X., Huang, C., Sexton, J.O., Channan, S., Feng, M. & Townshend, J.R. (2015). Use of Landsat and Corona data for mapping forest cover change from the mid-1960s to 2000s: Case studies from the Eastern United States and central Brazil. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **103**, 81–92.
- Spek, T. (1998). Interactions between humans and woodland in prehistoric and medieval Drenthe (The Netherlands): an interdisciplinary approach. In Kirby, K.J., Watkins, C., (Eds.), *The ecological history of European forests*. CABI Publishing, Wallingford, 81–94.
- Swetnam, T.W., Allen, C.D. & Betancourt, J.L. (1999). Applied historical ecology: using the past to manage for the future. *Ecological applications* **9**, 1189–1206.
- Szabò, P. (2015). Historical ecology: past, present and future. *Biological Reviews*, **90**, 997–1014.
- Talon, B. (2010). Reconstruction of Holocene high-altitude vegetation cover in the French southern Alps: evidence from soil charcoal. *Holocene*, **20**, 35–44.
- Talon, M., Bernard, V., Billand, G., Cottiaux, R., Pastre, J.P., Pernaud, J.M. & Prost, D. (1995). Le niveau organique du Néolithique récent du site stratifié de la “station d’épuration” à la Croix-Saint-Ouen (Oise). *Revue archéologique de Picardie*, **9**, 83–103.
- Théry-Parisot, I., Chabal, L., Ntinou, M., Bouby, L. & Carré, A. (2009). Du bois aux charbons de bois : approche expérimentale de la combustion. In Théry-Parisot, I., Chabal, L., Costamagno, S., (Eds), *Taphonomie des résidus organiques brûlés et la structure de combustion en milieu archéologique. Actes de la table ronde, Valbonne*,

- P@lethnologie*, **2**, 81–93.
- Théry-Parisot, I., Chabal, L. & Chrzavzez, J. (2010). Anthracology and taphonomy, from wood gathering to charcoal analysis. A review of the taphonomic processes modifying charcoal assemblages, in archaeological contexts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **291**, 142–153.
- Thinon, M. (1978). Pédanthracologie : une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le Néolithique. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, **287**, 1203–1206.
- Thinon, M. (1992). L'analyse pédanthracologique. Aspects méthodologiques et applications. Université d'Aix-Marseille, Marseille.
- Touflan, P., Talon, B. & Walsh, K., 2010. Soil charcoal analysis: a reliable tool for spatially precise studies of past forest dynamics: a case study in the French southern Alps. *Holocene*, **20**, 45–52.
- Touflan, P. & Talon, B. (2009). Spatial Reliability of Soil Charcoal Analysis: The Case of Subalpine Forest Soils. *Ecoscience*, **16**, 23–27.
- Vera, F.W.M. (2000). Grazing ecology and forest history. CABI Publishing, Wallingford.
- Warnick, A., Kupryjanowicz, M., Mueller-Bieniek, A., Karczewski, M. & Cywa, K. (2014). The environmental and cultural contexts of the late Iron Age and medieval settlement in the Mazurian Lake District, NE Poland: combined palaeobotanical and archaeological data. *Vegetation History and Archaeobotany*, **23**, 439–459.
- Woimant, G.P. (1980). Aperçu sur l'archéologie historique de la région de Compiègne. *Revue archéologique de l'Oise*, **19**, 15–29.
- Woimant, G.P. (1995). Carte archéologique de la Gaule, l'Oise. Pré-inventaire archéologique, Editions de la maison des sciences de l'homme, Paris.
- Yang, Y., Zhang, S., Yang, J., Chang, L., Bu, K., Xing, X. & (2014). A review of historical reconstruction methods of land use/land cover. *Journal of Geographical Science*, **24(4)**, 746–766.

## 1.10 Online Resources

## 1.10.1 Online Resource 1: Weight and number of charcoals per taxon in the pits and auger samples.

Tableau 16 : **a.-** Weight and number of charcoals per taxon and per level in the pits ; **b.-** Weight and number of charcoals per taxon and per node in the auger samples of the podzol ; **c.-** Weight and number of charcoals per taxon and per node in the auger samples of the cambisol ; **d.-** Weight and number of charcoals per taxon and per node in the auger samples of the luvisol. The weight of charcoals were given in g, weight of soil samples were given in kg

**a.**

podzol

Level	Quercus sp.		Betula sp.		Fagus syl.		Ilex aqu.		Populus_sp		Viburnum lan.		Ulmus sp.		Prunus_sp.		Maloideae		Pinus syl.		Corylus ave.		Angios.		Gymnos.		nd		glazed		total		soil sample		
	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	n b	weigh t	nb	weigh t	n b	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weight		
1	0.120	6	0.132	12	0.000	1	8	0	0	0	0	0.0141	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.006	1	0.351	3	2	0	0	0.1418	9	0	0	0.766	22.9	
2	0.368	6	1.176	13	0.099	1	32	0	0	0.005	2	0	0	0.0074	1	0.002	1	0	0	0	0	0	0	0.021	4	10	0	0	0.426	120	0.114	3	2.221	29	
3	0.976	6	0.639	4	0.217	3	60	0.0329	11	0.010	4	0.0076	1	0.0018	0	0	0	0.0326	1	0	0	0	0	0.072	7	12	0	0	0.3744	120	0.149	3	2.515	29.8	
4	0	0	0.006	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	4	1	0	0	0.015	1	5	0.008	2	0.0703	12	0.000	2	0.101	31.3
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0002	1	0	0	0.000	2	30.4

cambisol

level	Fagus syl.		Betula sp.		Quercus sp.		Rhamnus cat.		Corylus ave.		Populus_sp.		Prunus avi.		Maloideae		Viburnum lan.		Ilex aqu.		Angios.		nd		glazed		total		soil sample		
	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	n b	weigh t	nb	weigh t	n b	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weight
1	0.413	46	0.117	5	0.019	7	5	0.0419	5	0.004	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1551	10	0.099	6	36	8	3	0.8688	42.2	
2	0.106	8	0.053	8	0.039	1	21	0.1031	26	0.015	3	0.0027	2	0.0037	1	0	0	0	0	0	0	0.0470	1	3	9	3	7	28	1	0.7249	31.7
3	0.1	58	0.133	8	0.062	31	0.0015	1	0.017	5	12	0.0025	1	0.0011	1	0	0	0.0005	1	0.004	2	1	0.0568	3	79	3	46	0.6215	33.7		
4	0.032	1	0.090	4	0.019	8	5	0	0	0.020	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0228	2	1	19	8	10	0.3199	31.5		

luvisol

level	Fagus syl.		Carpinus bet.		Populus sp.		Corylus ave.		Betula sp.		Quercus sp.		Fraxinus exc.		Maloideae		Pinus sp.		Angios.		nd		glazed		total		soil sample		
	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	n b	weigh t	nb	weigh t	n b	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weigh t	nb	weight
1	0.307	1	0.343	45	0.115	2	23	0.0455	8	0.014	8	0.0086	1	0	0	0.012	1	0	0	0.036	2	4	0.031	8	5	1	0.106	3	24.5
2	0.437	91	0.230	5	0.021	2	8	0.0189	3	0.002	4	0	0	0.0021	1	0.013	2	0	0	0.026	3	12	0.0435	15	1	10	7	0.339	19.2
3	0.222	7	0.196	67	0.082	2	24	0.0075	5	0.018	7	0.0032	1	0	0	0	0	0	0	0.030	7	14	0.0199	12	5	20	5	0.662	19
4	0.031	7	0.012	13	0.032	7	16	0.0054	2	0	0	0.0016	1	0.0022	2	0	0	0.0018	1	0.014	7	5	0.0176	4	3	2	7	0.128	19.8
5	0.005	8	0	3	0	0	0.0008	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0104	3	0	0	0.017	21	

b.	Quercus sp.		Fagus syl.		Carpinus bet.		Acer sp.		Populus sp.		Corylus ave.		Prunus avi.		Angios.		nd		glazed		total		soil sample
	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight
1_1	0.0056	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0046	1	0	0	0.0102	2	0.7
1_2	0.0069	4	0	0	0	0	0	0	0.0028	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0034	1	0.0131	6	0.6
1_3	0.0216	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0216	6	0.6
1_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0009	1	0	0	0.0009	1	0.7
1_5	0	0	0	0	0.0022	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0069	2	0.0018	2	0	0	0.0109	5	0.5
2_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.021	2	0.021	2	0.9
2_2	0.1217	65	0	0	0	0	0	0	0.0081	1	0	0	0	0	0.0026	1	0.0042	3	0	0	0.1366	70	0.9
2_3	0	0	0.0022	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0022	1	0.8
2_4	0.0021	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0386	2	0.0023	1	0	0	0.043	4	0.9
2_5	0.0427	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0062	2	0	0	0	0	0.0134	5	0	0	0.0623	18	0.8
3_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0107	2	0	0	0.0107	2	0.9
3_2	0.0048	1	0.0019	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0067	2	0.6
3_3	0.0536	7	0.0013	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0039	3	0	0	0.0588	11	0.6
3_4	0.0029	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0017	1	0.003	2	0	0	0.0076	6	1
3_5	0.0071	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.002	3	0.0027	1	0.0118	7	1
4_1	0.0044	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0044	2	0.7
4_2	0.0176	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0032	3	0	0	0.0208	9	0.8
4_3	0.0156	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0019	1	0.0068	4	0	0	0.0243	7	0.9
4_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.003	1	0	0	0.003	1	1
4_5	0.212	58	0.0026	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0206	1	0.0162	7	0.0035	1	0.2549	75	0.8
5_1	0.0845	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0016	1	0.0163	7	0	0	0.1024	39	0.8
5_2	0.2983	88	0	0	0	0	0.0042	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0052	4	0	0	0.3077	94	0.8
5_3	0	0	0	0	0.0018	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0018	1	0.7
5_4	0	0	0.0028	1	0.0021	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0069	3	0.0028	2	0	0	0.0146	9	0.8
5_5	0.0087	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0053	1	0	0	0.014	2	0.5
6_1	0.2149	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0267	10	0.0021	2	0.2437	122	1
6_2	0.0273	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0273	11	0.7
6_3	0.5823	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0006	1	0.0271	10	0.0049	3	0.6149	93	0.8
6_4	0.0496	19	0	0	0.0066	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0562	20	0.8
6_5	0.0031	1	0.156	33	0	0	0.066	1	0	0	0	0	0.0055	1	0	0	0	0	0.0012	2	0.2318	38	0.4
Total	1.7873	510	0.1668	45	0.0127	6	0.0702	3	0.0109	2	0.0062	2	0.0055	1	0.0814	13	0.1594	72	0.0388	12	2.3392	666	23

## C.

	Fagus syl.		Quercus sp.		Acer sp.		Betula sp.		Ilex aqu.		Maloideae		Populus sp.		Rosaceae		Angios.		nd		glazed		total		soil sample
node	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight
1_1	0.0057	1	0.0014	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0027	2	0	0	0.0098	4	1
1_2	0.0278	10	0.0051	1	0	0	0	0	0.002	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0349	12	1.1
1_3	0.0345	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0114	1	0.0084	2	0.0118	2	0.0661	12	1
1_4	0.0667	11	0.0078	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0061	0	0.013	5	0	0	0.0936	17	0.9
1_5	0.0037	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0041	0	0.0029	2	0	0	0.0107	6	1.1
2_1	0.0258	7	0.0052	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0035	1	0.0057	3	0.011	1	0.0512	13	1.1
2_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0005	1	0.0315	1	0	0	0.032	2	0.9
2_3	0.0233	8	0	0	0.0091	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0207	6	0.0086	3	0.0063	2	0.068	20	1.3
2_4	0.0061	2	0.0035	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0043	2	0.0062	2	0.0201	7	1.1
2_5	0.0004	1	0.0012	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0063	1	0	0	0.0079	3	1.1
3_1	0.055	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0017	1	0	0	0	0	0.1727	8	0.0057	3	0.2351	28	1
3_2	0.0038	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0108	4	0	0	0.0146	7	0.9
3_3	0.0044	4	0.0119	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0061	0	0	0	0.0032	1	0.0256	10	0.9
3_4	0.0668	21	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0053	1	0	0	0	0	0.013	2	0.0121	3	0.0019	2	0.0991	29	0.9
3_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0131	2	0	0	0	0.0131	2	0.8	
4_1	0.1182	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0059	1	0	0	0.1241	6	0.8
4_2	0.0985	35	0.0123	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0302	1	0.0781	1	0.2191	40	1.1
4_3	0.013	6	0.0057	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0141	5	0.0036	1	0.0364	14	0.9
4_4	0.0335	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0022	1	0.0108	4	0.0027	2	0.0492	16	0.9
4_5	0.0627	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0191	1	0.0099	4	0	0	0.0917	10	1.1
5_1	0.039	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0045	3	0	0	0.0435	11	1
5_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0038	1	0	0	0.0038	1	1
5_3	0.008	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0042	5	0	0	0.0122	7	0.8
5_4	0	0	0.0012	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0015	1	0.0024	2	0.0045	1	0.0096	5	1
5_5	0.1751	47	0.0053	2	0	0	0.0005	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0156	7	0.0098	4	0.2063	61	1.1
6_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0041	1	0.005	1	0.0081	2	0	0	0.0172	4	0.9
6_2	0.0305	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0228	2	0.0044	3	0	0	0.0577	10	0.9
6_3	0.0102	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0037	1	0	0	0.0139	6	0.9
6_4	0	0	0.0023	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0021	2	0	0	0.0044	3	0.9
6_5	0.0255	10	0.0024	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0129	2	0.0107	5	0.0039	1	0.0554	19	1.1
Total	0.9382	232	0.0653	21	0.0091	1	0.0005	1	0.002	1	0.0053	1	0.0017	1	0.0041	1	0.1257	21	0.4094	82	0.1487	23	1.7263	385	29.5

d.

node	Fagus syl.		Carpinus bet.		Corylus ave.		Populus sp.		Maloideae		Betula sp.		Fraxinus exc.		Angios.		nd	glazed		total		soil sample	
	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb	weight	nb		weight	nb	weight	nb	weight	nb
1_1	0.0136	3	0.0056	2	0	0	0.0018	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0065	2	0	0	0.0275	8	1
1_2	0.0051	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0051	1	0.6
1_3	0	0	0.0053	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0055	2	0.0071	1	0.0179	5	1.9
1_4	0.006	1	0.0263	2	0.0422	4	0	0	0	0.0994	1	0	0	0	0	0.0269	5	0	0	0.2008	13	1.9	
1_5	0.0006	1	0	0	0	0	0.0135	1	0	0	0	0	0	0	0	0.0064	2	0.0079	1	0.0284	5	1	
2_1	0.1857	25	0.0421	2	0	0	0.003	1	0	0	0	0	0	0	0.0015	1	0.0073	5	0.0152	5	0.2548	39	1.9
2_2	0.0181	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3472	1	0	0	0.0044	1	0.3697	5	1	
2_3	0.0102	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0076	3	0	0	0.0178	4	0.9	
2_4	0.0095	1	0.0034	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0083	3	0.0694	10	0	0	0.0906	15	0.9
2_5	0.0468	1	0.0086	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0257	1	0.025	1	0.1061	5	1.9	
3_1	1.1108	171	0.2491	63	0.3931	38	0.1557	21	0	0	0.0134	1	0	0	0.0042	1	0.1625	39	0.2071	45	2.2959	379	1.9
3_2	0.5983	64	0.0311	10	0.2776	39	0.3566	39	0.0354	7	0	0	0	0	0.0075	2	0.2464	53	0.1548	31	1.7077	245	1
3_3	0.0109	1	0.0162	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0253	2	0.0112	1	0.0636	5	0.9	
3_4	0	0	0.0027	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0143	1	0	0	0.017	3	0.9	
3_5	0.0144	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0056	2	0.0114	1	0.0314	4	1.9	
4_1	0.0364	5	0.0125	3	0	0	0.0091	1	0	0	0	0	0	0	0.0008	1	0.0429	14	0	0	0.1017	24	1
4_2	0.2059	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0151	4	0	0	0.221	32	1.9	
4_3	0.0306	4	0	0	0	0	0.0133	1	0	0	0	0	0	0	0	0.0128	1	0	0	0.0567	6	0.9	
4_4	0	0	0.0129	5	0	0	0.0001	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.013	6	1.9	
4_5	0.0431	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0061	3	0.0083	4	0	0	0.0575	12	1.2
5_1	0.02	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0223	1	0.0081	2	0.0504	4	1	
5_2	0.0971	14	0.0074	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0067	1	0	0	0.0022	1	0	0	0.1134	18	1
5_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9
5_4	0.0169	1	0.0068	5	0.0038	3	0.0021	3	0	0	0.0019	2	0	0	0	0.0011	1	0	0	0.0326	15	1.2	
5_5	0.0335	3	0.0265	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	11	0.9	
6_1	0.0057	1	0	0	0.0069	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0126	2	1.9	
6_2	0.0648	9	0.0183	4	0.0014	1	0	0	0	0	0	0	0.0001	1	0	0	0.0045	4	0	0	0.0891	19	1
6_3	0.0054	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0171	1	0	0	0.0225	3	1.8	
6_4	0	0	0.0057	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0017	2	0	0	0.0074	3	0.9	
6_5	0.0138	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0246	5	0	0	0.0384	7	1.2	
Total	2.6032	349	0.4805	115	0.725	86	0.5552	69	0.0354	7	0.1147	4	0.0068	2	0.3756	12	0.762	165	0.4522	89	6.1106	898	38.3

## 1.10.2 Online Resource 2

## Average weight of fragments per taxon in the pits and auger samples.

Tableau 17 : **a.**- Average weight of charcoals (mg) per taxon and per level in the pits; **b.**- Average weight of charcoals (mg) per taxon and per node in the auger samples.

**a.**

**podzol**

Level	Quercus sp.	Betula sp.	Fagus syl.	Ilex aqui.	Populus sp.	Viburnum lan.	Ulmus sp.	Prunus sp.	Maloideae	Pinus sp.	Corylus ave.	Angios .	Gymnos .	nd	glazed	mean
1	10.1	7.0	0.0	0.0	0.0	14.1	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	175.7	0.0	15.8	0.0	14.7
2	2.8	6.1	3.1	0.0	2.7	0.0	7.4	2.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.0	3.6	3.9	4.3
3	3.4	7.6	3.6	3.0	2.6	7.6	0.0	0.0	32.6	0.0	0.0	6.1	0.0	3.1	4.8	4.1
4	0.0	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	3.0	4.0	5.9	0.8	4.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2

**cambisol**

level	Fagus syl.	Betula sp.	Quercus sp.	Rhamnus cat.	Corylus ave.	Populus sp.	Prunus sp.	Maloidea e	Viburnum lan.	Ilex aqui.	Angios.	nd	glazed	mean
1	9.0	5.9	3.9	8.4	4.0	0.0	0.0	4.6	0.0	0.0	15.5	2.8	2.9	6.8
2	1.9	2.4	1.9	4.0	5.0	1.4	3.7	0.0	0.0	0.0	15.7	2.6	2.2	2.6
3	1.7	3.0	2.0	1.5	1.5	2.5	1.1	0.0	0.5	4.2	18.9	1.9	1.9	2.2
4	2.7	8.2	4.0	0.0	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.4	5.2	3.5	4.9

**luvisol**

level	Fagus syl.	Carpinus bet.	Populus sp.	Corylus ave.	Betula sp.	Quercus sp.	Fraxinus exc.	Maloidea e	Pinus sp.	Angios.	nd	glazed	mean
1	6.8	10.4	5.0	5.7	3.0	8.6	0.0	12.0	0.0	9.1	3.9	4.5	7.1
2	4.8	5.5	2.7	6.3	2.4	0.0	2.1	13.2	0.0	2.2	2.9	4.8	4.6
3	3.3	2.7	3.4	1.5	3.1	3.2	0.0	0.0	0.0	2.2	1.7	4.1	3.0
4	2.4	2.1	2.0	2.7	0.0	1.6	1.1	0.0	1.8	2.9	4.4	4.2	2.5
5	1.9	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	2.4

b.

<b>node</b>	<b>podzol</b>	<b>cambisol</b>	<b>luvisol</b>
1_1	5.1	2.5	3.4
1_2	2.2	2.9	5.1
1_3	3.6	5.5	3.6
1_4	0.9	5.5	15.4
1_5	2.2	1.8	5.7
2_1	10.5	3.9	6.5
2_2	2.0	16.0	73.9
2_3	2.2	3.4	4.5
2_4	10.8	2.9	6.0
2_5	3.5	2.6	21.2
3_1	5.4	8.4	6.1
3_2	3.4	2.1	7.0
3_3	5.3	2.6	12.7
3_4	1.3	3.4	5.7
3_5	1.7	4.4	7.9
4_1	2.2	17.7	4.1
4_2	2.3	5.5	6.9
4_3	3.5	2.6	9.5
4_4	3.0	3.1	2.2
4_5	3.4	9.2	4.8
5_1	2.6	4.0	12.6
5_2	3.3	3.8	6.3
5_3	1.8	1.7	0.0
5_4	1.6	1.9	2.2
5_5	7.0	3.4	5.5
6_1	2.0	4.3	6.3
6_2	2.5	5.8	4.7
6_3	6.6	2.3	7.5
6_4	2.8	1.5	2.5
6_5	6.1	2.9	5.5
<b>Mean</b>	3.5	4.5	6.8

## 2 Conclusion

A l'issue de cet article, des éléments de réponses aux questions de recherche développées en introduction peuvent être apportés en guise de conclusion. L'appendice 6 est à consulter ici pour visualiser la distribution hétérogène et aléatoire des taxons en fonction des litres, des horizons et du type pédologique de la forêt de Compiègne.

### 1. L'utilisation des deux méthodes d'échantillonnage permet-elle une meilleure représentation de la diversité taxonomique de l'antracocénose ?

L'emploi de ces deux méthodes de prélèvements a pour conséquence de cumuler les avantages des deux approches. La première est verticale avec la fosse pédologique. Celle-ci recueille le **maximum de diversité**. Cette richesse spécifique est concentrée dans la fenêtre 15-35 cm du sol. Les fonds de fosses (< 40 cm) délivrent un seul taxon spécifique (*Pinus*) cependant inutilisable en datation <sup>14</sup>C car trop petit. La deuxième approche est spatiale avec les 30 sondages tarières sur 1000 m<sup>2</sup>. Elle inventorie une plus faible diversité, de par la faible profondeur du carottage (0-20 cm), mais propose de nouveaux taxons. Cette technique **rend donc mieux compte de la variabilité spatiale** des charbons. Ainsi, l'association de ces deux procédés dans une même stratégie d'échantillonnage offre une bien meilleure image des communautés végétales passées conservées aujourd'hui dans l'antracocénose des sols.

### 2. Peut-on se fonder sur la distribution verticale des charbons pour repérer les périodes passées de changement en essences forestières ?

L'homogénéité des assemblages anthracologiques dans les sols, ajoutée à une absence totale de stratification entre l'âge des charbons et leurs profondeurs de prélèvements nous amènent à la conclusion qu'il n'y a pas de structuration verticale des charbons dans les sols forestiers. Le rôle majeur des bioturbations est ici pointé du doigt car seul ce vecteur peut expliquer la remontée vers la surface de charbons anciens ainsi que le mélange des signaux d'incendies à travers les horizons. Par bioturbations nous entendons la flore (racines, chablis) et la faune du sol : lumbricidae, insectes (fourmis) et mammifères (taupe, lapin...).

### 3. Par l'intégration de la pédoanthracologie à l'écologie historique, pouvons-nous produire une lecture fiable des changements d'usages des sols depuis l'Antiquité ainsi que de l'évolution forestière du massif de Compiègne depuis le Moyen-Âge ?

Une interprétation fondée uniquement sur une approche pédoanthracologique expliquerait difficilement les changements de végétation que nous observons dans le temps. Nous avons vu que la surface explorée, la quantité d'échantillons traitée ainsi que l'effectif de charbons datés posent des limites à la pédoanthracologie. S'impose alors un traitement pluridisciplinaire de l'évolution de la forêt de Compiègne comme le propose l'écologie historique. Dans cette vision, la pédoanthracologie s'associe parfaitement à l'archéologie et l'histoire en apportant un soutien, des preuves et des données factuelles aux hypothèses formulées sur cette évolution depuis les premiers siècles de notre ère. Cette démarche pourrait-elle s'élargir à la forêt européenne ?

La forêt feuillue européenne se caractérise par la pratique d'un pâturage intensif durant le Moyen-Âge. Ce mélange forêt-prairie était multifonctionnel. Il servait aussi bien à l'alimentation des hommes et des animaux (domestiques et sauvages) qu'à l'approvisionnement en bois de feux et de construction. La morphologie du paysage et de la végétation de l'époque, composés de vastes étendues herbacées surplombées d'arbres disséminés formant un couvert forestier très ouvert, se rapprochait de la savane. Ce paysage favorisait donc les chênes et les essences forestières héliophiles.

Ces éléments historiques et écologiques se retrouvent dans le territoire de Compiègne. Notre approche pédoanthracologique a notamment mis au jour un stade médiéval de forêt ouverte peuplée de bouleaux, de divers feuillus héliophiles et de chênes. Cette similitude entre notre zone d'étude et la forêt européenne permet sans doute l'extrapolation de nos résultats à la forêt feuillue tempérée d'Europe en ce qui concerne l'interaction homme-environnement dans le temps.



## Chapitre V : Synthèse des résultats, conclusion et perspectives

---

Le nord de la France offre des **territoires forestiers anciens aux passés riches**, car bien renseignés par les sources archéologiques et historiques, **et diversifiés**, dans l'espace et le temps (évolution des usages, histoire variant selon les forêts), ce qui en font des sites d'étude privilégiés pour l'analyse de l'interaction homme – forêt (*Chapitre 2*). La prise en compte du **temps** dans cette relation interdépendante est la particularité de **l'écologie historique**. Cette dernière est, par définition, **pluridisciplinaire** et englobe tout un panel d'approches de diagnostic et de lectures des écosystèmes naturels-anthropisés. La **pédoanthracologie** s'est révélée pertinente dans cette démarche puisqu'elle permet de reconstituer les environnements et paysages passés ainsi que leur évolution dans le temps en apportant des **éléments emboîtables** à ceux de l'archéologie et de l'histoire. Son utilisation depuis 20 ans a soulevé des questions quant à son intégration en écologie historique. Cela concerne la **représentativité** des résultats et la **variation spatiale** des charbons (*Chapitre 1*).

L'entreprise de ce doctorat est motivée par **trois objectifs** : i) **fiabiliser statistiquement la pédoanthracologie** afin de l'intégrer à l'approche plus globale de l'écologie historique des forêts, ii) reconstituer les **écosystèmes forestiers passés** ainsi que leur évolution jusqu'à nos jours, et enfin, iii) retrouver les traces des **usages et anciennes perturbations** naturelles et/ou anthropiques (*Chapitre 2*).

Les **courbes de raréfactions** ajoutées à la **partition additive de la biodiversité** (indices  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) sont des outils d'observation pertinents de la richesse spécifique (Bacaro *et al.* 2012, Clark *et al.* 2011, Chiarucci *et al.* 2009, Crist & Veech 2006). Employés en écologie pour mesurer l'impact des surfaces d'observations sur la diversité et pour valider la représentativité des protocoles d'échantillonnages, ces outils d'analyses sont appliqués à la pédoanthracologie pour évaluer **l'influence de la technique de prélèvement** sur la diversité et pour fixer **l'effort minimal d'échantillonnage** en nombre de litres et en nombre de charbons identifiés (*Chapitre 3*). A profondeurs comparables, les indices de diversité  $\beta$  et  $\gamma$  ne sont pas influencés par **l'étendue** de l'échantillonnage comme le démontrent les valeurs similaires entre les fosses, 2.25 m<sup>2</sup>, et les tarières, 1000 m<sup>2</sup>. En revanche, les fosses rassemblent systématiquement **plus de diversité** si l'on considère l'ensemble des horizons explorés. Malgré les résultats contrastés des courbes de raréfactions, nous sommes parvenus à un **minimum requis, fixé à 24 l et 500 charbons** pour la couche superficielle du sol. Des effets « méthode » et « station » ont été détectés, élevant considérablement cette recommandation. Plus la prospection est profonde et plus l'effort doit augmenter, idem si la conservation des charbons est mauvaise ou si la diversité de la biocénose est élevée. Le minimum évolue donc à **128 l et 1000 charbons identifiés** pour une fosse complète. Cet

effort est supérieur à celui employé dans la littérature. De nombreuses études pédoanthracologiques associent plusieurs sites de prélèvements pour aboutir aux interprétations historiques mais avec un nombre d'identifications par fosse **nettement inférieur à notre préconisation**. Citons pour exemple, Compostella (2012) avec une moyenne estimée de **47** charbons identifiés par fosse, Jansen (2012) affiche **102** individus par profil, Robin (2014) en observe **313** et enfin Cunill (2013) en comptabilise en moyenne **357** par fosse. Se pose alors la question de la **stratégie d'échantillonnage**. Dans beaucoup de travaux scientifiques, pour prendre en compte la variabilité spatiale, le choix est fait de multiplier les fosses tout en limitant le nombre de prélèvements et de charbons à identifier. Il en résulte une potentielle exclusion de certains taxons. Inversement, comme nos résultats le prouvent, explorer moins de fosses peut permettre de prélever plus de quantité de sol et donc plus d'individus, au **profit de la diversité taxonomique**. Pour une prise en compte de la distribution spatiale, l'approche tarière sera finalement plus appropriée. Nos résultats sur ce premier point de l'effort d'échantillonnage proviennent de la prospection de **trois sites d'études**, chacun caractérisé par un type de sol spécifique. Il serait judicieux de procéder aux déterminations anatomiques des charbons de **Saint Gobain** afin de **doubler** ces tests de représentativité de l'effort d'échantillonnage. Saint Gobain permettra d'évaluer **l'influence du contexte historique** sur le protocole pédoanthracologique puisque le passé industriel de ce massif est déjà visible sur les fortes valeurs d'antracomasses. Au regard du caractère **chronophage** de la pédoanthracologie<sup>27</sup>, il serait opportun, pour l'évolution de la discipline, de mettre en place un **partage de données** entre chercheurs au niveau international afin d'appliquer la méthode des **courbes de raréfactions** fondées sur les individus identifiés. De cette manière, nous pourrions renforcer considérablement la recommandation concernant la représentativité des efforts d'échantillonnages en nombre d'identifications taxonomiques. Cette démarche permettrait d'intégrer à plus large échelle les effets « sol » et « histoire des forêts » tout en prenant en compte les variations induites par les zones biogéographiques. La base internationale « **Global Charcoal Database**<sup>28</sup> » pourrait être employée dans cette perspective mais elle est peu renseignée pour les approches pédoanthracologiques. Sa vocation première réside dans l'enregistrement des paléo-incendies et le partage de ces informations. L'initiative d'un **regroupement de données anthracologiques** à l'échelle internationale a été évoquée par Scheel-Ybert (2015) lors de la sixième rencontre internationale d'anthracologie qui s'est tenue à Freiburg. Elle propose la création de la base « **Anthrakos** » dans le but de mettre en partage les bases de données mais surtout les expériences concernant la reconnaissance taxonomique des charbons. Nous **encourageons** vivement ces démarches puisqu'elles permettront des avancées sur ces questions protocolaires.

Au sujet de la **distribution des charbons**, nous nous sommes intéressés à leurs répartitions verticale et horizontale (*Chapitre 3*). **Verticalement**, les niveaux les plus riches en charbons et taxons sont situés dans la fenêtre **0-40 cm** de profondeur. Ces niveaux sont à explorer en priorité. Les horizons profonds sont systématiquement pauvres en antracomasse et en diversité même s'ils peuvent abriter un taxon rare, comme *Pinus sylvestris* dans notre cas. De plus, ces charbons présentent rarement le poids minimal requis pour une datation par le radiocarbone. La profondeur du fragment **n'indique en rien son ancienneté** car il n'y a

<sup>27</sup> Pour cette Thèse : traitement des 648 l d'échantillons / 819 kg de terre en 10 mois, identification de 4 515 individus / 16 taxons en 12 mois et obtention des datations radiocarbone en 6 mois.

<sup>28</sup> <http://www.paleofire.org/index.php>

aucune stratification des âges des charbons dans un sol. Ce mélange des dépôts anthracologiques résulte d'un processus qui reste encore peu compris. Les futurs résultats des travaux de Robin & Kelm (2015) au sujet de l'analyse expérimentale de la **taphonomie des assemblages anthracologiques** seront riches d'enseignements pour nous permettre de comprendre les dynamiques d'enfouissements des charbons dans un sol forestier. Cette expérimentation consiste en un dépôt de charbon de bois à même le sol et un suivi de son enfouissement à travers un échantillonnage pédoanthracologique à t+1 ans, t+5 ans et t+10 ans. Les charbons introduits ont été créés artificiellement et calibrés à 1 cm<sup>3</sup>. La variabilité taxonomique est également prise en compte puisque quatre espèces sont utilisées. Le choix des taxons est fonction de l'homogénéité du bois (gymnosperme et angiosperme) ainsi que de la présence de zones poreuses dans le bois initial pour les feuillus. Ce type d'approche très locale permettra également de tester l'hypothèse selon laquelle les **bioturbations** du sol sont des agents majeurs d'enfouissement des macro fragments. Les **déplacements des charbons** dans le sol pourraient être **modélisés** pour simuler les forces en présence dans le compartiment pédologique. Ce dernier est limité à ses deux extrémités par l'interface sol-atmosphère et la roche-mère. Les vecteurs de déplacement dans le sol sont la **force de gravité** et les **bioturbations** (racines, faune, chablis). La première est facile à modéliser, en revanche la deuxième est plus complexe car difficile à quantifier et très aléatoire. Nous connaissons le positionnement des charbons dans le sol ainsi que leur temps de séjour grâce à la datation au radiocarbone. Le modèle pourrait alors illustrer le **déplacement des fragments** depuis leur création lors de l'incendie (dépôts sur le sol) jusqu'à nos jours (profondeur de prélèvement). La simulation devrait également amener à une distribution des charbons présentant un **pic d'accumulation** situé à 15-35 cm de profondeur. Un tel modèle serait pertinent pour comprendre l'influence des bioturbations sur la **remobilisation des charbons** dans un sol.

**Horizontalement**, nous avons cherché à prédire les variations spatiales des anthracomasses et des taxons en nous appuyant sur l'indice I de Moran. Cet indice permet de détecter l'**autocorrélation spatiale** qui démontre la ressemblance entre prélèvements voisins. Dans notre étude, nos résultats laissent apparaître qu'une autocorrélation n'est possible qu'à **35 cm** de distance. Hormis ce résultat, aucune autre distance testée ne s'est révélée significative et cela quel que soit la méthode de prélèvement employée. Les résultats obtenus par Vleminckx *et al.* (2014) vont dans le **même sens** avec une ressemblance entre voisins à 20 cm de distance et une structure spatiale hétérogène en l'appliquant à 10 m et plus. Cette publication traite, notamment, de la distribution des charbons en utilisant l'indice I de Moran en situation de forêt tropicale ce qui offre un contexte écologique, anthropique et historique très différent de la forêt feuillue européenne. Dans leur travaux, Plue & Hermy (2011) ont réussi à obtenir un **modèle prédictif** de la répartition horizontale des espèces de la **banque de graines** pour les cinq premiers centimètres du sol en s'appuyant sur un échantillonnage extrêmement fin composé de 49 prélèvements sur une surface de 4 m<sup>2</sup>. Les graines du sol sont soumises aux mêmes vecteurs de déplacements que les autres macroéléments tels que les charbons. Ces résultats nous amènent à considérer qu'un **patron de répartition des charbons** dans l'espace est observable à l'échelle **décimétrique**. Au-delà, les études pédoanthracologiques se confrontent à une distribution totalement **aléatoire** des charbons.

Toutefois, il reste à tester d'autres échelles de mesure pour approfondir l'autocorrélation spatiale des charbons dans les horizons superficiels du sol. Il faudra chercher à déceler un

patron de distribution spatiale entre **0.5 m et 4 m** d'éloignement entre voisins. Une **autre perspective** intéressante serait de mesurer la distribution spatiale des charbons déposés **sur le sol post-incendie** afin de vérifier si ce dépôt respecte une distribution structurée ou non. Si une **corrélation spatiale est détectée**, cette analyse devra être répétée dans le temps, à t+6 mois, t+1 ans et ainsi de suite. Le but est de déterminer la **vitesse d'intégration** des fragments de surface dans le sol révélée par la diminution des anthracomasses et une perte progressive du signal spatial. En revanche, si la distribution est **aléatoire** dès l'origine du dépôt alors la répartition spatiale des charbons sera définitivement classée comme imprévisible.

Le **nouveau protocole** proposé dans le *Chapitre 3*, est destiné à prendre en compte ces distributions verticales et horizontales selon **trois échelles de mesures** : centimétrique (bioturbations), métrique (peuplement forestier) ou hectométrique (massif). Il est adaptable car le chercheur peut décider de travailler à l'échelle du peuplement seulement et réaliser alors un échantillonnage sur 0.1 ha composé de 30 sous-échantillons issus des sondages tarières. De même, l'échelle plus fine de la placette peut être exploitée afin de mesurer la **corrélation spatiale** entre les 32 carottages espacés de 30 cm. Ce protocole nécessite d'être maintenant éprouvé sur **d'autres territoires** (régionaux, nationaux et internationaux) afin de multiplier les contextes et diversifier les variables environnementales, historiques et forestières. La forêt **méditerranéenne** propose une dynamique d'incendies beaucoup plus soutenue que la forêt tempérée, une forte diversité en végétation ligneuse et une co-évolution avec l'homme très ancienne. Les **boisements d'altitudes** ont été modelés par l'homme depuis de nombreux millénaires (Néolithique) avec des défrichements au profit du pâturage. Ils subissent actuellement les effets du changement climatique constatés par la baisse de la limite supérieure des arbres. Il y a également la forêt **boréale** avec sa diversité ligneuse spécifique et ses sols modelés par l'action du froid. Autant de cas de figure qui permettraient d'avoir une vision globale sur la distribution des charbons et la représentativité des efforts d'échantillonnage.

**L'intégration** de la **pédoanthracologie** en **écologie historique** concrétisée pour les forêts de Compiègne et de Saint Gobain constitue une **avancée** dans la connaissance de l'histoire respective de ces deux territoires. Les abondances d'anthracomasses de ces deux massifs permettent à elles-seules de distinguer de manière significative les deux milieux à partir de 25 litres de sol seulement tirés au sort pour chaque forêt. **Saint Gobain**, de par une **gestion sylvicole** intensive mise en place au XVIII<sup>ème</sup> siècle ainsi que par la présence d'une filière verrière et forestière depuis la fin du Moyen-Âge, affiche une abondance très forte en charbons (*Chapitre 3*). Cependant, les archives recouvrant cette période pluriséculaire, du XV<sup>ème</sup> au XVIII<sup>ème</sup> siècles, ne mentionnent que très peu d'incendies. Ceux-ci ne concernent d'ailleurs pas nos trois sites d'études. Procéder aux identifications taxonomiques et à une série de datations <sup>14</sup>C permettrait de connaître l'origine de ces dépôts. Sont-ils des incendies non mentionnés en raison d'une **lacune** d'archivage, sont-ils antérieurs au XV<sup>ème</sup> siècle, **pré-médiévaux** ou encore **contemporains** ?

Concernant **Compiègne** (*Chapitre 4*), son évolution sur les deux derniers millénaires est mieux connue. Cinq périodes de son histoire sont maintenant clairement identifiées : durant **l'Antiquité**, le territoire de Compiègne était exclusivement traité en usage agricole comme le prouvent les vestiges archéologiques, le LIDAR et l'absence de charbons. Pendant le **Haut**

**Moyen-Âge**, la forêt reconquiert les terres agricoles qui ont été progressivement abandonnées depuis la chute de l'empire romain. L'histoire nous apprend que le stade forestier est présent dès le VI<sup>ème</sup> siècle. Le **Moyen et le Bas Moyen-Âge** se caractérisent par une forêt très ouverte avec une abondance d'espèces héliophiles (*Betula*, *Populus*). La forêt est alors largement utilisée par les hommes. De nombreux droits d'usages sont alors en vigueur au bénéfice de la population locale mais aussi des institutions religieuses et hospitalières dont le droit de mise en culture et celui du **pâturage**. Ce dernier, **intensif**, impacte la forêt et sa régénération. Les traces de cette pratique sont toujours visibles aujourd'hui avec la présence d'abondantes galeries de carabidés dans le podzol. Le couvert forestier très ouvert de l'époque est également favorable aux chênes qui se maintiennent et structurent probablement la forêt. De la **fin du Moyen-Âge au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle**, nous constatons une maturation de la forêt comme le démontrent les charbons de hêtre. Le couvert forestier tend à se refermer en raison d'un contexte démographique impacté par les famines, les épidémies et les guerres. Les populations baissent tout comme les usages. La forêt garde cependant des traces des usages intensifs et diversifiés des siècles passés. Viendra s'ajouter à cela l'augmentation des effectifs de grands gibiers laissés en libre évolution pour répondre aux besoins de la chasse royale. Du **XVIII<sup>ème</sup> siècle à nos jours**, la forêt a poursuivi sa fermeture, la hêtraie atlantique dominant clairement le paysage. Les usages ont progressivement été supprimés et la gestion sylvicole a pris le pas sur les autres pratiques exercées en forêt. Le massif de Compiègne s'est vu réhabilité dans son rôle de production ligneuse. Rappelons toutefois que l'effectif des 15 datations <sup>14</sup>C, même s'il a prouvé sa fiabilité, reste relativement faible. Pour permettre d'affiner la reconstitution historique de la forêt d'autres fragments de charbons pourraient être soumis à datation. Replacer dans le temps des individus de *Quercus* participerait à la **reconstitution de la forêt pâturée**, de même que des taxons du groupe **héliophile-pionnier** comme *Populus* qui accompagnaient alors les chênes dans ces périodes d'usages et de pâturages intensifs.

L'utilisation de la pédoanthracologie apporte donc des **éclairages importants** sur l'histoire et l'évolution des écosystèmes forestiers du nord de la France. L'homme tient une place prépondérante dans ce processus et il a semé derrière lui des traces archéologiques, historiques et anthracologiques qui, une fois rassemblées, nous permettent une **lecture précise et globale** de l'évolution des paysages et des forêts (e.g. Dupouey *et al.* 2004). Les forêts que nous avons étudiées sont représentatives de nombreuses **forêts feuillues de plaine en Europe** (*Chapitre 1*). Cela se vérifie au niveau **écologique** avec la place considérable de la hêtraie climacique et de la hêtraie-chênaie mais également au niveau **historique**. En effet, les droits d'usages étaient en vigueur dans la plupart des pays et royaumes de l'Europe centrale et d'ouest au Moyen-Âge tout comme les réserves de chasses royales qui ont perduré jusqu'aux temps modernes. La **forêt pâturée** fut le système en place sur le grand territoire Européen pendant de nombreux siècles (Hartel *et al.* 2013, Rackham 2008, Rotherham 2007). L'adéquation du contexte global entre Compiègne et les forêts feuillues de plaines d'Europe valide l'extension de notre approche et de nos conclusions à ce large territoire en ce qui concerne la pédoanthracologie et l'écologie historique. Pour la pédoanthracologie c'est la **stratégie d'échantillonnage** et les **méthodes** de vérifications de la représentativité des résultats qui peuvent être reproduites. En ce qui concerne l'écologie historique, ce sont nos **conclusions** sur les **interactions** entre l'homme et son environnement naturel qui sont à étendre.

## Références

- Bacaro, G., Rocchini, D., Ghisla, A., Marcantonio, M., Neteler, M. & Chiarucci, A. (2012). The spatial domain matters: Spatially constrained species rarefaction in a Free and Open Source environment. *Ecological Complexity*, **12**, 63–69.
- Chiarucci, A., Bacaro, G., Rocchini, D., Ricotta, C., Palmer, M. & Scheiner, S. (2009). Spatially constrained rarefaction: incorporating the autocorrelated structure of biological communities into sample-based rarefaction. *Community Ecology*, **10**, 209–214.
- Clark, K., Lewis, M. & Ostendorf, B. (2011). Additive partitioning of rarefaction curves: Removing the influence of sampling on species-diversity in vegetation surveys. *Ecological Indicators*, **11**, 132–139.
- Compostella, C., Trombino, L. & Caccianiga, M. (2012). Late Holocene soil evolution and treeline fluctuations in the Northern Apennines. *Quaternary International*, **289**, 46–59.
- Crist, T.O. & Veech, J.A. (2006). Additive partitioning of rarefaction curves and species-area relationships: Unifying  $\alpha$ -,  $\beta$ - and  $\gamma$ -diversity with sample size and habitat area. *Ecology Letters*, **9**, 923–932.
- Cunill, R., Soriano, J.M., Bal, M.C., Pèlachs, A., Rodriguez, J.M. & Pérez-Obiol, R. (2013). Holocene high-altitude vegetation dynamics in the Pyrenees: A pedoanthracology contribution to an interdisciplinary approach. *Quaternary International*, **289**, 60–70.
- Dupouey, J.L., Dambrine, E., Dardignac, C. & Albertucci, J.M. (2004). La mémoire des forêts actes du colloque « forêt, archéologie et environnement » 14-16 décembre 2004. Office national des forêts, Institut national de la recherche agronomique, Direction régionale des affaires culturelles de Lorraine, Paris - Nancy.
- Hartel, T., Dorresteijn, I., Klein, C., Máthé, O., Moga, C.I., Öllerer, K., Roellig, M., von Wehrden, H. & Fischer, J. (2013). Wood-pastures in a traditional rural region of Eastern Europe: Characteristics, management and status. *Biological Conservation*, **166**, 267–275.
- Jansen, D., Lungershausen, U., Robin, V., Dannath, Y. & Nelle, O. (2012). Wood charcoal from an inland dune complex at Joldelund (Northern Germany). Information on Holocene vegetation and landscape changes. *Quaternary International*, **289**, 24–35.
- Plue, J. & Hermy, M. (2012). Consistent seed bank spatial structure across semi-natural habitats determines plot sampling. *Journal of Vegetation Science*, **23**, 505 – 516.
- Rackham, O. (2008). Ancient woodlands: modern threats. *New Phytologist*, **180**, 571–586.
- Robin, V. & Kelm, R. (2015). Experimental analyze of the taphonomy of soil charcoal assemblages. *6<sup>th</sup> International Anthracology Meeting*, 112.
- Robin, V., Bork, H.-R., Nadeau, M.-J. & Nelle, O. (2014). Fire and forest history of central European low mountain forest sites based on soil charcoal analysis: The case of the eastern Harz. *The Holocene*, **24**, 35–47.
- Rotherham, I.D. (Ed.). (2013). *Trees, forested landscapes, and grazing animals: a European perspective on woodlands and grazed treescapes*. Routledge, Taylor & Francis Group, London.
- Scheel-Ybert, R. (2015). Index ANTHRACORUM: creation of a global directory for charcoal collections. *6<sup>th</sup> International Anthracology Meeting*, 120.
- Vleminckx, J., Morin-Rivat, J., Biwolé, A.B., Daïnou, K., Gillet, J.-F., Doucet, J.-L., Drouet, T. & Hardy, O.J. (2014). Soil Charcoal to Assess the Impacts of Past Human Disturbances on Tropical Forests (B. Hérault, Ed.). *PLoS ONE*, **9**, e108121.

# Table des figures

---

Figure 1 : Visualisation du modèle d'élévation a) avec la végétation.....	22
Figure 2 : Visualisation des anciennes charbonnières en forêt de Braconne (Vautier et al. 2014).....	22
Figure 3 : Transformation d'une biocénose vivante en anthracocénose fossile (dépôt primaire) et le problème de représentativité de l'échantillonnage pédoanthracologique (Delhon 2004).....	29
Figure 4 : Possibilités de successions des différentes végétations causées par l'anthropisation et le pâturage à partir de la forêt primaire et (Ellenberg 1986, 1988, Vera 2000).....	31
Figure 5 : Carte de localisation de la zone d'étude et des forêts domaniales de Compiègne et Saint Gobain.....	42
Figure 6 : Coupe géologique simplifiée pour la forêt de Saint Gobain.....	44
Figure 7 : Carte des unités d'étude du massif. Les symboles rouges indiquant les feux connus, le cercle rouge la zone d'étude (Buridant 1999). ....	46
Figure 8 : Nombre de délits forestiers recensés pour la maîtrise de La Fère (Buridant 1999).....	47
Figure 9 : Changement dans le traitement de la forêt de St Gobain du XVI <sup>ème</sup> au XVIII <sup>ème</sup> siècle (Buridant 1999). ....	48
Figure 10 : Carte de l'évolution forestière de Saint Gobain depuis 1820. ....	49
Figure 11 : Carte de localisation des sites d'études à Saint Gobain. (5) pour cambisol, (6) pour podzol et (7) pour luvisol.....	51
Figure 12 : Localisation des parcelles étudiées en forêt de Saint Gobain.....	51
Figure 13 : Illustration du profil de sol du podzol de Saint Gobain.....	52
Figure 14 : Profil pédologique du podzol de Saint Gobain.....	53
Figure 15 : Profil pédologique .....	54
Figure 16 : Profil pédologique du cambisol de Saint Gobain.....	55
Figure 17 : Profil pédologique du luvisol de Saint Gobain. ....	56
Figure 18 : Profil pédologique du luvisol de Saint Gobain. ....	57
Figure 19 : Coupe géologique simplifiée de la forêt de Compiègne.....	58
Figure 20 : Carte des sites antiques (points rouges) en forêt de Compiègne (Thuillier P.). ....	60
Figure 21 : Cartographie des anomalies topographiques pour le site luvisol Compiègne. Le point bleu représente la fosse pédologique, les lignes orangées indiquent le réseau de dessertes actuel et les flèches rouges les reliquats de l'usage agricole de la terre à l'antiquité.....	61
Figure 22 : Répartition des établissements ruraux gaulois et des villae dans l'Oise (Fémolant et al. 1996). ....	61

Figure 23 : Carte des sites médiévaux (points bleus) en forêt de Compiègne (Thuillier P.).	62
Figure 24 : Carte de l'évolution de la surface forestière de Compiègne depuis 1820.	65
Figure 25 : Carte de localisation des sites d'études en forêt de Compiègne. (8) pour podzol, (9) pour cambisol et (10) pour luvisol.	66
Figure 26 : Cartographie du réseau de dessertes (en orange), du microrelief et de la formation dunaire (flèches rouges) pour le podzol de Compiègne. En bleu la fosse pédologique du site.	67
Figure 27 : Chablis de hêtre en parcelle 3202 et preuve du plancher de silex à 170 cm de profondeur par la racine pivot en angle droit (flèche rouge).	68
Figure 28 : Profil pédologique du podzol de Compiègne et zoom sur l'horizon Ah2 enterré et les galeries de bousiers indiqués par les flèches rouges.	68
Figure 29 : Profil pédologique du podzol de Compiègne.	69
Figure 30 : Illustration du profil de sol du cambisol de Compiègne.	70
Figure 31 : Localisation de la parcelle 6301.	70
Figure 32 : Profil pédologique du cambisol de Compiègne.	71
Figure 33 : Illustration du profil de sol du luvisol de Compiègne.	72
Figure 34 : Profil pédologique du luvisol de Compiègne.	73
Figure 35 : Representation of the two sampling strategies.	80
Figure 36 : Rarefaction curves with their 95% confidence interval for the different soil types (top: podzol; middle: cambisol; bottom: luvisol) of Compiègne, based on the number of identified charcoals. Left panels: comparison between the pit, auger and up-soil-pit. Right panels: soil-depth levels of the pit. Solid lines: interpolated curves; dotted lines: extrapolated curves.	85
Figure 37 : Boxplot for the distribution of SA (mg/kg) by depth level (cm) for the six soil pits, for Saint Gobain (on the right) and Compiègne (on the left). (a)-(b): podzol, (c)-(d): cambisol, (e)-(f): luvisol.	93
Figure 38 : Correlograms accounting for the spatial autocorrelation in the anthracomass distribution. (a) auger sampling from Saint Gobain; (b) auger sampling from Compiègne; (c) pit sampling of the cambisol from Compiègne; (d) pit sampling of the podzol from Compiègne. (○= not significant, ●= significant $p < 0.1$ ).	94
Figure 39 : Rarefaction curves with their 95% confidence interval for the different soil types (top: podzol; middle: cambisol; bottom: luvisol) of Compiègne, based on the number of soil litres. Left panels: comparison between the pit, auger and up-soil-pit. Right panels: soil-depth levels of the pit. Solid lines: interpolated curves; dotted lines: extrapolated curves.	97
Figure 40 : Répartition spatiale des valeurs des anthracomasses pour les 6 maillages tarières des forêts de Compiègne à gauche et de Saint Gobain à droite. (a) et (b) pour podzol, (c) et (d) pour cambisol, (e) et (f) pour luvisol.	99
Figure 41 : Cartes des prédictions des valeurs d'anthracomasses (mg kg <sup>-1</sup> ) à gauche et des valeurs d'anthracomasses spécifiques pour le hêtre à droite sur 1000 m <sup>2</sup> pour le luvisol de Compiègne. Sont représentés les 30 prélèvements tarières (o) ainsi que l'emplacement de la fosse pédologique (X).	100

- Figure 42 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 5 horizons de la fosse du podzol de Compiègne. (a) pour 5 cm, (b) pour 16 cm, (c) pour 37 cm, (d) pour 58 cm et (e) pour 83 cm..... 101
- Figure 43 : Proposition de protocole pédoanthracologique prenant en compte la variabilité horizontale et verticale des dépôts. Trois échelles spatiales sont proposées : (a) maillage systématique de 30 sites de 1000 m<sup>2</sup> réparties sur 400 000 m<sup>2</sup> (rectangle de 400 \* 1000 m). Le centre de chaque site est espacé de 100 m en X et 200 m en Y. (b) représente un site de 1000 m<sup>2</sup> (rectangle de 20 \* 50 m) composé de 30 placettes de 2 m<sup>2</sup> systématiquement réparties et dont les centres sont espacés de 5 m en X et 10 m en Y. (c) pour la placette de 2 m<sup>2</sup> constituée de 32 sondages tarières espacés de 30 cm en X et en Y et explorant la profondeur 0-40 cm. .... 104
- Figure 44 : Maps showing the human impact on the Compiègne forest through historical times..a: frequency of Gallo-Roman sites on a surface of 500m x 500m (after field archaeological data). b: local users' pressure during the Medieval period; permanent villages and religious estates appears as circles and squares, respectively; triangles represent temporary glass furnaces; the pressure from distant users is not shown. c. Land cover in 1728 (after Baillieul, G., 1728. Carte de la foret de Compiègne et de ses environs, BNF, C&P, GE DD-2987 (861B)). d: tree plantations since the late 18th century (after the archives of the French Office for Forests). ..... 113
- Figure 45 : Sampling design. On the left: the 20 x 50 m grid centered on the soil pit, with the 30 georeferenced (X-Y) nodes at which an auger sample was taken. On the right: vertical profile of the soil within the pit, with the 5 samples per level (horizontal dashed line) at four depths per pit side..... 114
- Figure 46 : Spatial distribution of total specific anthracomass (SA) values split according to the successional status of corresponding taxa, for the podzol (a), cambisol (b) and luvisol (c). Light grey: light-demanding, early-successional; dark grey: shade intolerant, mid-successional; black: shade-tolerant, late-successional. The circles size illustrated the specific anthracomass. The diameter of the pie chart is proportional to the SA value (maximal value = 1707.7 mg.kg<sup>-1</sup>). A cross indicates no charcoal retrieved at this node. The central pie chart gives the results for the pit sampling. .... - 118 -
- Figure 47 : Anthracological diagrams for the pits of podzol, cambisol and luvisol. The Xaxis gives the weight per taxon (mg.kg<sup>-1</sup>); the Y-axis ranks the sampling levels, numbered from top to bottom. Each column corresponds to a taxon. Taxa are ordered according to their abundance (in weight) from the left to the right, followed by fuzzy taxa (Angios: Angiosperms, Gymnos: Gymnosperms), unidentified taxa (ND: not determined, Glazed: Glazed charcoals) and the cumulated anthracomass per level (SAL). The corresponding number of charcoals per level and per taxon is reported for each bar. - 120 -
- Figure 48 : Anthracological diagrams (mg.kg<sup>-1</sup>) from the auger sampling of the podzol, cambisol and luvisol. The X-axis gives the X-Y coordinates of the samples (see Figure 45); the Y-axis gives the weight per taxon (mg.kg<sup>-1</sup>). Each line corresponds to a taxon. Taxa are ordered according to their abundance (in weight) from the bottom to the top, followed by fuzzy taxa (Angios: Angiosperms, Gymnos: Gymnosperms), unidentified taxa (ND: not determined, Glazed: Glazed charcoals) and the cumulated anthracomass (SA). The corresponding number of charcoals per node and per taxon is reported over each bar- 121 -

Figure 49 : Distribution verticale des anthracomasses selon la forêt, le sol et la profondeur. IC = Intervalle de confiance à 95%. (a) pour St Gobain et (b) pour Compiègne. ....	158
Figure 50 : Distribution horizontale des anthracomasses pour la profondeur 0-20 cm. Exemple pour le luvisol de la forêt de St Gobain. ....	160
Figure 51 : Corrélogrammes des fosses podzosol (a) et sol calcaire (b) de Compiègne. L'indice I de Moran est calculé pour chaque horizon et à chaque classe de distance (35 cm). (o = non significatif, ● = significatif $p < 0,05$ ). ....	161
Figure 52 : Courbes de raréfaction et partition additive de la diversité pour le luvisol de Compiègne. (a) pour la fosse tous niveaux confondus, (b) pour les 30 tarières. Autour des courbes figure l'intervalle de confiance à 95%. ....	162
Figure 53 : Frise chronologique de l'histoire de la forêt de Compiègne depuis le Ier siècle de notre ère. Sur la moitié supérieure, les faits historiques. Sur la moitié inférieure, les 15 datations <sup>14</sup> C de charbon provenant des 3 sites de la forêt. ....	162
Figure 54 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 6 niveaux de la fosse du podzol de Saint Gobain. (a) pour 5 cm, (b) pour 20 cm, (c) pour 30 cm, (d) pour 50 cm, (e) pour 70 cm et (f) pour 100 cm. ....	171
Figure 55 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 3 niveaux de la fosse du cambisol de St Gobain. (a) pour 10 cm, (b) pour 25 cm et (c) pour 40 cm. ....	172
Figure 56 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 5 niveaux de la fosse du luvisol de Saint Gobain. (a) pour 5 cm, (b) pour 15 cm, (c) pour 35 cm, (d) pour 57 cm et (e) pour 85 cm. ....	173
Figure 57 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 4 horizons de la fosse du cambisol de Compiègne. (a) pour 5 cm, (b) pour 16 cm, (c) pour 37 cm et (d) pour 45 cm. ....	174
Figure 58 : distribution des valeurs des anthracomasse selon les 4 faces de la fosse du luvisol de Compiègne. (a) pour 5 cm, (b) pour 20 cm, (c) pour 35 cm, (d) pour 50 cm et (e) pour 70 cm. ....	175
Figure 59 : Correlogramme concernant le test d'autocorrélation spatiale de la distribution des anthracomasses des tarières du luvisol de Compiègne pour l'anthracomasse globale (SA) (courbe noire) et pour l'anthracomasse spécifique du taxon Fagus (courbe bleue). (○ = non significatif, ● = significatif $p < 0.3$ ). ....	176
Figure 60 : Semi-variogrammes pour l'anthracomasse (SA à gauche) et l'anthracomasse spécifique du hêtre (Fagus sylvatica) (SAT à droite) construits à partir des tarières du luvisol de Compiègne. ....	176
Figure 61 : Diagrammes anthracologiques des 5 niveaux pour la fosse du podzol de Compiègne. En abscisse le nombre de litres traités et en ordonnée l'anthracomasse spécifique (mg.kg <sup>-1</sup> ) de chaque catégorie. ....	179
Figure 62 : Diagrammes anthracologiques des 4 niveaux pour la fosse du cambisol de Compiègne. En abscisse le nombre de litres traités et en ordonnée l'anthracomasse spécifique (mg.kg <sup>-1</sup> ) de chaque catégorie. ....	181
Figure 63 : Diagrammes anthracologiques des 5 niveaux pour la fosse du luvisol de Compiègne. En abscisse le nombre de litres traités et en ordonnée l'anthracomasse spécifique (mg.kg <sup>-1</sup> ) de chaque catégorie. ....	183

# Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Approvisionnement de bois pour la Manufacture Royale au XVIII <sup>ème</sup> siècle (Buridant 1999). .....	47
Tableau 2 : Caractérisation physico-chimique des horizons du podzol de Saint Gobain. .	53
Tableau 3 : Caractérisation physico-chimique des horizons du cambisol de Saint Gobain. ....	55
Tableau 4 : Caractérisation physico-chimique des horizons du luvisol de Saint Gobain.	57
Tableau 5 : Attribution des routes créées en forêt de Compiègne aux différents rois de France (Buridant 2008). .....	63
Tableau 6 : Cahier des charges des Panneliers pour le reboisement en forêt de Compiègne en 1779 (Buridant 2008). .....	64
Tableau 7 : Caractérisation physico-chimique des horizons du podzol de Compiègne.....	69
Tableau 8 : Caractérisation physico-chimique du cambisol de Compiègne. ....	71
Tableau 9 : Caractérisation physico-chimique du luvisol de Compiègne. ....	73
Tableau 10 : Results from the two sampling schemes per site and per soil type. The results of post hoc Nemenyi tests ( $P < 0.05$ ) are reported as exponent letters on median $\pm$ standard error values of SA, number of identified charcoals, and species richness. ....	82
Tableau 11 : List of taxonomic diversity by study sites (podzol, cambisol and luvisol) and the sampling methods (soil pit and auger). ....	95
Tableau 12 : Results of additive partitioning of biodiversity and slope parameters of individual and sample-based rarefaction curves for the three sites of Compiègne forest. $\alpha$ charcoals, $\gamma$ charcoals, $\alpha$ liters and $\gamma$ liters items indicate the numbers of charcoals or liters taken into account to obtain the $\alpha$ and $\gamma$ values. ....	96
Tableau 13 : Comparaison des valeurs d'antracomasses prédites et réelles pour l'antracomasse totale et celle du hêtre. La médiane $\pm$ erreur standard est donnée pour les valeurs réelles. ....	100
Tableau 14 : Specific antracomass per taxon (SAT) and number of occurrences (occ; the maximal value, i.e. the total number of sampling points, is given in brackets) across the three soil types for the two sampling designs. ....	117
Tableau 15 : AMS-14C dates of the 15 charcoals. Radiocarbon dates calibrated in AD, at 2 $\sigma$ confidence interval, based on the IntCal13 dataset (Reimer et al., 2013). ....	122
Tableau 16 : a.- Weight and number of charcoals per taxon and per level in the pits ; b.- Weight and number of charcoals per taxon and per node in the auger samples of the podzol ; c.- Weight and number of charcoals per taxon and per node in the auger samples of the cambisol ; d.- Weight and number of charcoals per taxon and per node in the auger samples of the luvisol. The weight of charcoals were given in g, weight of soil samples were given in kg .....	130
Tableau 17 : a.- Average weight of charcoals (mg) per taxon and per level in the pits; b.- Average weight of charcoals (mg) per taxon and per node in the auger samples. ....	134
Tableau 18 : Données pédologiques par site et par horizon pour St Gobain (site 5 = sol calcaire, site 6 = podzosol, site 7 = luvisol) et Compiègne (site 8 = podzosol, site 9 = sol calcaire, site 10 = luvisol). A pour argile, L pour limon et S pour sable. ....	159

## Table des appendices

---

Appendice 1 : Article publié dans la revue du Nord Hors-série Collection Arts – Archéologie.....	152
Appendice 2 : Rappel des différents étages paléoclimatiques.....	169
Appendice 3 : Plantes préconisées pour les garennes dans les anciens traités d'agronomies.....	170
Appendice 4 : Distribution spatiale des anthracomasses par horizons et par sols pour Saint Gobain ainsi que pour le cambisol et le luvisol de Compiègne.....	171
Appendice 5 : Données complémentaires concernant le traitement spatiale des anthracomasses.....	176
Appendice 6 : Répartition des taxons selon les faces des fosses.....	177



# Appendice 1

---

Article publié dans : la revue du Nord Hors-série Collection Arts – Archéologie.

**PEDOANTHROLOGIE : APPROCHE METHODOLOGIQUE ET STATISTIQUE. MIEUX APPREHENDER L'HISTOIRE ET L'EXPLOITATION ANTHROPIQUE PASSEE DES SOLS FORESTIERS.**

Thomas FEISS, Helene HOREN, Boris BRASSEUR, Jonathan LENOIR, Jérôme BURIDANT, Guillaume DECOCQ.

Université de Picardie Jules Verne, laboratoire EDYSAN, FRE 3498, 1 rue des Louvels, 80037 Amiens Cedex 1, FRANCE ([thomas.feiss@gmail.com](mailto:thomas.feiss@gmail.com)).

## Résumé

La pédoanthracologie vise à donner une image diachronique des paysages forestiers. Cependant, la représentativité des profils pédoanthracologiques reste très discutée. Dans ce travail, 3 types de sols de 2 massifs forestiers anciens du nord de la France (Compiègne et St Gobain) ont été échantillonnés. Chaque site a fait l'objet d'un échantillonnage en fosse et par tarière. Les données anthracologiques sont examinées du point de vue quantitatif (distribution des anthracomasses) et qualitatif (composition spécifique). L'indice de Moran, déterminé pour les anthracomasses, montre qu'il existe une autocorrélation spatiale à 35 ou 70 cm dans les horizons supérieurs des fosses. Ce résultat disparaît dans les horizons profonds en relation avec l'activité biologique du sol. Les espèces ont été identifiées pour le massif de Compiègne. Les courbes de raréfaction représentant la richesse spécifique en fonction du nombre de charbon ont été construites et soumises à une partition additive de la diversité. L'augmentation de la richesse est plus rapide et plus représentative par la méthode des tarières. Pour la fosse, plus d'espèces sont recueillies au total, mais l'effort d'échantillonnage, à adapter selon les horizons, est insuffisant pour parler de représentativité.

**Mots-clefs :** autocorrélation spatiale, courbe de raréfaction, effort minimal d'échantillonnage, écologie historique des forêts, bioturbation.

**Abstract**

Soil charcoal analysis aims at giving a serie of pictures of forest landscapes over time. However, many questions remain about how far soil charcoal profiles are representative of forest communities. We sampled three types of soils from two ancient forests of northern France (Compiègne and St Gobain), using two contrasted techniques: a single soil pit versus several auger-taken soil cores. The anthracological data is considered both quantitatively (distribution of charcoal masses) and qualitatively (species composition). The Moran I index reveals spatial autocorrelation of charcoal masses at 35 or 70 cm in the upper horizons of the pits, but no spatial pattern below as a plausible effect of the soil biological activity. The species identified in the Compiègne forest were used to build rarefaction curves that were subsequently submitted to additive partitioning of diversity. Species diversity increased faster and was more representative when the auger sampling method was used. The pit technique allows to retrieve more species, but the sampling effort was still insufficient to be representative and has to be adapted according to the horizon depth.

**Keywords:** spatial autocorrelation, rarefaction curve, minimal sampling effort, forest historical ecology, bioturbation.

## Introduction

De nombreux travaux se sont appuyés sur une double approche écologique et historique pour étudier l'impact des usages anciens sur la végétation actuelle<sup>29</sup>. Les périodes considérées sont séculaires à pluriséculaires et le calage temporel des usages anciens peut être établi à partir d'archives<sup>30</sup> ou par une approche archéologique. Ces travaux ont montré des impacts durables de ces pratiques anciennes sur les conditions du sol et les espèces présentes, allant parfois jusqu'à considérer que ces impacts sont irréversibles<sup>31</sup>. Cette persistance est reflétée, par exemple, par des taux de phosphore ou d'azote<sup>32</sup> plus importants dans les sols jadis cultivés que dans des sols forestiers anciens.

Pour reconstituer les écosystèmes passés en identifiant les plantes qui s'y développaient, les archives botaniques du sol comme les pollens, les graines et les charbons de bois peuvent être étudiées. Contrairement aux pollens qui se dégradent par oxydation dans les sols<sup>33</sup>, les charbons de bois se conservent correctement d'où leur utilisation en archéologie<sup>34</sup>. Une méthode « pédoanthracologique » a été élaborée par Carcaillet et Thinon (1996). Dans une fosse pédologique, 5 à 10 L de sol par niveau sont échantillonnés, les charbons sont extraits, pesés puis identifiés. La finalité de cette approche est de retracer l'histoire des changements en espèces ligneuses pour une zone géographique donnée. La pédoanthracologie a été largement utilisée, soit pour retrouver l'ancienne limite supérieure des arbres en montagne au cours de l'Holocène<sup>35</sup>, soit pour reconstituer l'histoire des feux de forêts<sup>36</sup>, soit encore pour comprendre la dynamique des forêts de montagnes<sup>37</sup> et de plaines<sup>38</sup>. La distribution spatiale des charbons de bois a principalement été décrite verticalement à partir des anthracomasses, qui représentent la masse de charbon par unité de masse de sol. Les premiers modèles mettent en lien l'âge des charbons avec leur profondeur ; néanmoins la confrontation de ces modèles avec des datations met en évidence un brassage vertical probablement d'origine biologique<sup>39</sup>. La distribution horizontale des charbons de bois a plus rarement été considérée. Talon *et al.* (2005) remarque une forte hétérogénéité spatiale des anthracomasses (sur 2500 m<sup>2</sup>) et Touflan *et al.* (2008) décrit cette hétérogénéité en termes d'espèces. Au-delà du constat, aucune étude n'a cherché à identifier une structure horizontale dans la distribution des masses ou des espèces. Enfin, si la pédoanthracologie permet l'identification d'espèces ligneuses anciennes, la représentativité statistique de la diversité ligneuse n'a jamais été envisagée.

Dans la présente étude, nous avons réalisé un échantillonnage pédoanthracologique selon un protocole original permettant de mieux comprendre le mécanisme de la distribution verticale et horizontale des charbons et d'estimer l'effort minimal d'échantillonnage

---

<sup>29</sup> HERMY, VERHEYEN 2007 ; DUPOUEY 2002

<sup>30</sup> VALLAURI 2012

<sup>31</sup> DAMBRINE 2007 ; DECOCQ 2004 ; DUPOUEY 2002 ; PLUE 2008

<sup>32</sup> GLATZEL 1999

<sup>33</sup> LOWE 1982

<sup>34</sup> MARGUERIE, HUNOT 2007

<sup>35</sup> TALON 1998

<sup>36</sup> TALON 2005

<sup>37</sup> TOUFLAN 2010

<sup>38</sup> ROBIN 2011

<sup>39</sup> CARCAILLET, TALON 1996 ; GOEPP 2007

nécessaire pour utiliser au mieux les données anthracologiques en écologie historique des forêts. Pour la première fois, des méthodes de traitements empruntées à l'écologie ont été appliquées à la distribution spatiale des anthracomasses et à la biodiversité ligneuse carbonisée d'une zone géographique encore vierge de travaux pédoanthracologiques.

## 1. Description et historique de la zone d'étude

Les massifs de Compiègne et de St Gobain sont des forêts domaniales anciennes situées dans le nord de la France. Leurs conditions climatiques sont voisines, de type océanique dégradé. Les précipitations moyennes mensuelles sont de 51.5 mm et la température moyenne varie de 1.6°C en hiver à 18.3°C en été. Les conditions géologiques sont similaires dans le sens où l'on retrouve dans les deux forêts 3 types géologiques : le calcaire, le sable et le limon. Pour Compiègne, il s'agit plus précisément de craies, sables de Bracheux et limon de plateau. A St Gobain, nous rencontrons du Lutétien supérieur, des sables de Beauchamp et de Cuise et du limon Loessique. L'existence de ces deux forêts est avérée depuis le Moyen-Âge<sup>40</sup>. Les contextes historiques de développement de ces deux massifs sont très différents. La forêt de St Gobain est une ancienne forêt de production à destination des industries du verre<sup>41</sup>. Cette mission est maintenue jusqu'aujourd'hui avec une orientation vers le bois d'œuvre et d'énergie. Les essences principales sont *Quercus robur*, *Q. petraea* et *Fagus sylvatica*.

L'histoire de la forêt de Compiègne est différente, puisqu'à son emplacement actuel de nombreux sites antiques ont été mis au jour. La nature agricole de ces occupations anciennes laisse penser que la zone n'était pas forestière à l'époque gallo-romaine. Entre le V<sup>e</sup> et le XI<sup>e</sup> siècles, nous disposons de très peu de données sur l'état et l'évolution de ces bois. En revanche, dès le XII<sup>e</sup> siècle, de nombreuses sources indiquent une forte présence de l'homme en forêt. Puis, à partir du XV<sup>e</sup> siècle, l'aménagement cynégétique de la forêt a été favorisé et entretenu pendant un long laps de temps en vue des chasses royales puis impériales. Actuellement l'accueil du public est très important pour cette forêt mais sa première mission est la production de bois. Les essences principalement cultivées sont *Fagus sylvatica*, *Quercus robur*, *Q. petraea*, *Pinus sylvestris* et *nigra*.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Sélection des sites et échantillonnage

L'échantillonnage a été conduit par massif pour trois types de substrats : sol sur roche calcaire, podzsol et luvisol<sup>42</sup> afin de prendre en compte différentes dynamiques forestières, avec les cortèges floristiques qui y sont associés. L'homogénéité topographique, en privilégiant les positions de plateau, et l'absence de perturbations récentes associées à l'exploitation forestière, ont guidé le choix des sites de prélèvements<sup>43</sup>. Nous avons travaillé

<sup>40</sup> Compiègne : *Histoire des Francs* par Grégoire de Tours (4<sup>ème</sup> livre), VI<sup>e</sup> siècle. St Gobain : BURIDANT 1999

<sup>41</sup> BURIDANT 1999

<sup>42</sup> AFES, 2008

<sup>43</sup> CARCAILLET, THINON 1996

dans des peuplements forestiers matures. Les placettes, d'une surface de 1000 m<sup>2</sup>, étaient éloignées des chemins d'accès, des fossés de drainage ou de tout autre aménagement.

Deux techniques de prélèvement ont été appliquées à chacune des zones :

(i) des prélèvements au sein d'une fosse pédologique centrale de dimensions 1,5 m x 1,5 m et 1,5 m de profondeur maximale, réalisés par horizon ou par niveau régulier, en commençant pas le fond de la fosse. Contrairement au protocole classique d'échantillonnage anthracologique<sup>15</sup>, chaque niveau a été prélevé sur les 4 côtés de la fosse à raison de 20 x 1 L de terre. Ce protocole permet de décomposer l'effort d'échantillonnage en litres et de s'intéresser à la distribution spatiale des charbons dans la fosse.

(ii) des prélèvements à l'aide d'une tarière pédologique de 20 cm de profondeur, consistant en 30 prélèvements de 1 L dans un maillage de 30 points régulièrement répartis autour de la fosse. L'espacement minimum entre deux prélèvements était de 5 m. Chacun a été géolocalisé en vue d'analyses spatiales ultérieures.

## 2.2. Caractérisation des sols

Sur le terrain, les textures, les structures, les couleurs des horizons pédologiques ont été notées, les pourcentages et tailles des racines et des éléments grossiers évalués. Pour chaque fosse, des échantillons de sol ont été prélevés par horizon afin de déterminer leurs pH eau selon la norme NF ISO 10390:2004.

Une analyse granulométrique a également été pratiquée pour chaque niveau de prélèvement selon la norme en vigueur à l'aide d'un granulomètre laser (Malvern Mastersizer, passeur Hydro 2000 MU).

## 2.3. Extraction, identification et datation des charbons

Les échantillons pédoanthracologiques ont été séchés à l'air libre pendant 48 h, pesés puis placés dans un bain d'eau 48 h de plus, avec adjonction de défloculant ((NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>) si nécessaire. Un passage dans une cuve rotative a été nécessaire pour les prélèvements très riches en argile. Le tamisage s'est fait sous colonne humide de 3 filtres de mailles 3,9 mm, 1,9 mm et 0,8 mm. Les charbons ont été extraits des tamis, ainsi que les éléments grossiers (EG) correspondant au refus du tamis 3,9 mm, puis séchés à l'air libre avant d'être pesés. La quantité d'échantillons traités a été ajustée selon l'estimation de charbons présents. Les 30 prélèvements à la tarière ont été extraits pour les 6 sites. Dans les fosses, 20 L par niveau ont été traités pour les sols sur roche calcaire et podzosols de Compiègne. Les luvisols de Compiègne et de St Gobain étant plus riches en charbons, 12 à 13 L ont été traités par niveau (3 L par face). Enfin, les sols sur roche calcaire et podzosols de St Gobain montrant une richesse en charbons beaucoup plus importante lors des prélèvements, le nombre de litres traités a été réduit de 5 à 6 L par niveau (1 à 2 L par face).

L'Anthracomasse Spécifique (AS en mg.kg<sup>-1</sup>)<sup>15</sup>, a été calculée par la formule suivante :  $AS = C \div (L - EG)$ , avec C = poids des charbons secs (mg), L = poids de l'échantillon avant mise en bain (kg) et EG = poids des éléments grossiers (mg).

L'identification des charbons de bois a été réalisée sur les 3 sites de Compiègne à l'aide d'un microscope à lumière réfléchi (Leica® dm 2500). Elle est facilitée par l'utilisation d'atlas anatomiques du bois<sup>44</sup> ainsi que par une collection de référence. Cette collection a été créée à partir des différentes essences forestières que l'on rencontre dans la région. Les différents plans anatomiques du bois (transversal, radial et tangentiel) ont été observés afin d'identifier l'espèce présente.

Une sélection de 15 charbons a été datée par la technique AMS radiocarbone au laboratoire Poznan Radiocarbon Laboratory (Pologne). Le choix des charbons a été fait selon l'essence, le poids et la qualité du fragment. Les dates ont ensuite été calibrées sur la plateforme Oxcal en utilisant la référence IntCal13. Nous avons sélectionné 3 taxons : *Betula sp.*, espèce héliophile pionnière peu longévive ; *Fagus sylvatica*, essence sciaphile climacique, souvent indirectement favorisée par les aménagements cynégétiques et *Rhamnus cathartica*, espèce héliophile.

#### 2.4. Analyse des données

Nous avons, tout d'abord, analysé les données d'antracomasse de façon à identifier si un schéma de distribution dans l'espace des charbons existait ou non. À partir d'une matrice de voisinage, les corrélogrammes basés sur l'indice I de Moran ont été utilisés pour détecter les structures spatiales des 30 prélèvements à la tarière et des 20 prélèvements par horizon dans les fosses. Le seuil de significativité que nous avons fixé pour détecter les corrélations positives est de 0,05.

Ensuite, nous avons analysé les données floristiques afin de traiter de l'effort d'échantillonnage et de sa représentativité statistique. Les courbes de raréfaction représentent la richesse spécifique (exprimée en nombre d'espèces) en fonction de l'effort d'échantillonnage (exprimé en nombre de charbons). Elles ont été construites séparément pour les deux techniques d'échantillonnage (fosse et tarière), à l'aide de la fonction *specaccum* sous R. L'obtention d'une asymptote indique que le seuil de représentativité est atteint (i.e., la richesse en espèces ligneuses n'augmente plus significativement quand l'effort d'échantillonnage est accru). Un intervalle de confiance à 95% (1.96 x déviation standard) autour des courbes permet de visualiser directement d'éventuelles différences significatives entre plusieurs courbes. Les courbes de raréfaction ont ensuite fait l'objet d'une partition additive, qui produit trois indices de diversité : diversité alpha (= diversité locale, correspondant au nombre d'espèces estimé pour 10 charbons choisis aléatoirement), diversité gamma (= diversité totale, correspondant à la valeur de l'asymptote) et diversité beta (= hétérogénéité locale, donnée par la relation  $\beta = \gamma - \alpha$ ). Ces 3 valeurs étant standardisées, elles permettent de comparer directement les différents sites et les deux techniques d'échantillonnage.

Le logiciel R 3.0.3 (Core Team 2014) a été employé pour réaliser analyses et figures à l'aide des packages « ncf » pour la corrélation spatiale et « vegan » pour les courbes de raréfaction.

---

<sup>44</sup> SCHWEINGRUBER 1990a-b

### 3. Résultats

#### 3.1. Distribution des anthracomasses (AS)

Dans les horizons des 6 fosses, les quantités de charbons sont significativement supérieures pour St Gobain avec un intervalle allant de 0 à 4499  $\text{mg.kg}^{-1}$  contre 0 à 258  $\text{mg.kg}^{-1}$  pour Compiègne. Cependant, les distributions verticales des charbons sont très comparables d'un site à l'autre, quel que soit le massif considéré (Figure 49). Les niveaux supérieurs sont toujours plus riches que les niveaux profonds. La diminution des masses de charbons quand la profondeur augmente est sans relation avec les changements de texture des horizons dans 5 cas sur 6 (Tableau 18). Dans le seul cas du luvisol de St Gobain, la diminution de l'AS se produit dans le niveau où l'on retrouve un enrichissement en argile (horizon Bt), celui-ci pouvant être un obstacle à la migration des charbons. Ce n'est pas le cas ailleurs, comme, par exemple, dans le podzosol de Compiègne où l'AS diminue fortement entre 40 et 60 cm alors que la texture reste sableuse sur tout le profil.

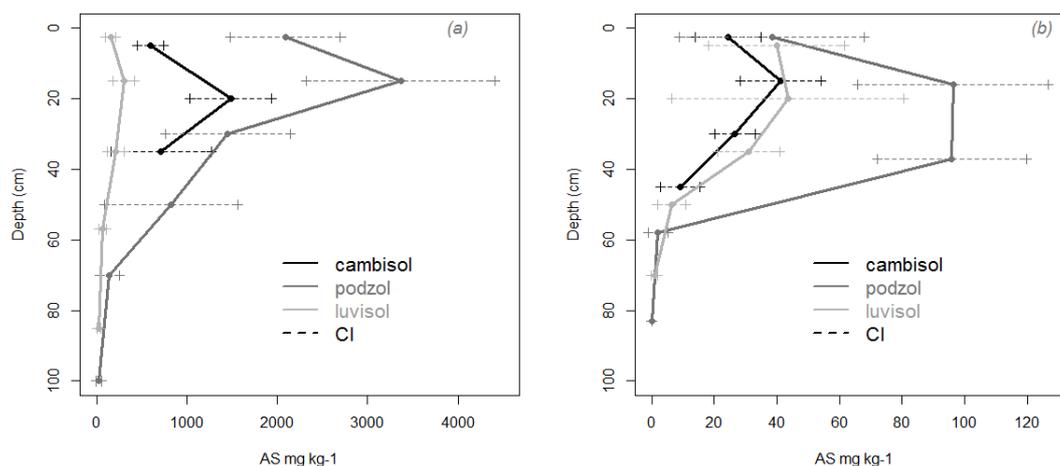


Figure 49 : Distribution verticale des anthracomasses selon la forêt, le sol et la profondeur. IC = Intervalle de confiance à 95%. (a) pour St Gobain et (b) pour Compiègne.

Ce contraste entre couches de surface et couches de profondeur est d'autant plus marqué que le profil de sol est épais ( $> 1$  m). Ainsi le sol sur roche calcaire de St Gobain a une AS de 715  $\text{mg.kg}^{-1}$  pour le niveau de prélèvement le plus profond (40 cm), alors que le podzosol et le luvisol de Compiègne ont une AS de 0  $\text{mg.kg}^{-1}$  (70 cm). Pour toutes les fosses, le niveau de prélèvement pour lequel l'AS est la plus élevée est le second depuis la surface (16 ou 20 cm).

Concernant les prélèvements à la carrière, la richesse en charbons est encore significativement supérieure pour St Gobain avec un intervalle allant de 0 à 40 189  $\text{mg.kg}^{-1}$  contre 0 à 1421  $\text{mg.kg}^{-1}$  pour Compiègne.

Tableau 18 : Données pédologiques par site et par horizon pour St Gobain (site 5 = sol calcaire, site 6 = podzolosol, site 7 = luvisol) et Compiègne (site 8 = podzolosol, site 9 = sol calcaire, site 10 = luvisol). A pour argile, L pour limon et S pour sable.

site	horizon	Profondeur (cm)	Couleur (sol humide)	pH H2O	EG %	Racines %	A (%)	L (%)	S (%)
5	Ah	0-2	10 YR 2/2	7.71	0	30	14.74	40.92	44.33
	(B)	2-17	10 YR 3/2	7.82	15	40	19.94	44.25	35.81
	Bt	17-38	10 YR 4/4	8	25	35	21.71	52.86	25.43
	C	38	-	8.08	100	-	21.81	44.30	33.89
6	Ah	0-18	7.5 YR 3/2	3.94	5	15	6.06	30.63	63.309
	Ae	18-45	7.5 YR 4/3	4.3	15	20	13.24	32.05	54.704
	Bs	45-100	10 YR 7/6	4.44	15	16	10.96	11.74	77.292
	C	100		5.07	0	0	-	-	-
7	Ah	0-4	10 YR 2/2	4.39	0	40	16.39	62.887	20.728
	Ae	4-14	10 YR 4/3	4.39	0	30	16.39	62.887	20.728
	Bt1	14-45	10 YR 4/4	4.57	0	15	24.83	59.199	15.972
	Bt2	45-105	10 YR 5/4	5.12	0	5	17.85	65.538	16.612
8	Ah	0-5	10 YR 2/1	3.79	0	60	2.59	13.495	83.912
	Ae	5-32	10 YR 5/1	4.33	0	55	4.37	22.199	73.429
	Ah2	32-39	10 YR 2/1	3.98	0	60	2.06	11.485	86.452
	E2	39-66	10 YR 7/1	4.88	0	5	1.29	2.719	95.992
	Bh	66-109	5 YR 2.5/2	4.57	0	5	1.84	4.168	93.993
	Bs	109-160	10 YR 6/6	5.04	0	0	3.46	5.531	91.005
9	Ah	0-6	7.5 YR 2.5/3	4.49	0	65	9.19	32.366	58.443
	(B)	6-38	7.5 YR 4/4	5.05	10	40	11.53	20.134	68.333
	Bt	38-65	5 YR 4/6	6.05	5	60	15.92	22.608	61.475
	C	65	-	-	-	-	-	-	-
10	Ah	0-4	7.5 YR 3/1	4.62	0	75	15.19	59.683	25.125
	Ae	4-11	10 YR 4/3	4.67	0	45	17.35	57.894	24.761
	Bt1	11-45	10 YR 5/4	4.88	0	20	19.65	58.799	21.552
	Bt2	45-99	7.5 YR 5/4	5.35	0	5	17.16	54.679	28.164

### 3.2. Structure spatiale de l'antracomasse

L'indice de Moran a été calculé pour les 30 prélèvements du maillage horizontal de chaque site. La distance minimale entre les échantillons est de 5 m. A cette distance minimale, aucune autocorrélation spatiale n'a été détectée. Les valeurs de l'indice de Moran oscillent entre 1 et -1, ce qui traduit une distribution hétérogène et aléatoire du nombre de charbons de bois prélevés en surface. Ce résultat est obtenu quels que soient la forêt et le type de sol (Figure 50 : exemple du luvisol de St Gobain).

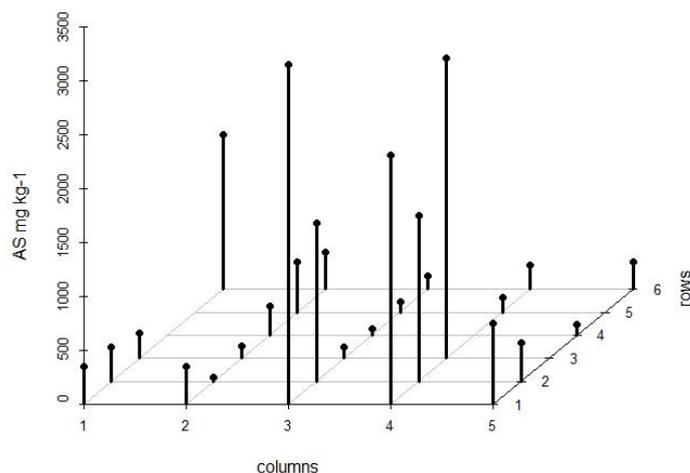


Figure 50 : Distribution horizontale des anthracomasses pour la profondeur 0-20 cm. Exemple pour le luvisol de la forêt de St Gobain.

Dans les fosses, la distance entre deux échantillons consécutifs d'un même niveau est de 35 cm. La figure 51 présente les corrélogrammes du sol sur calcaire et du podzsol de Compiègne, construits à l'aide des 20 L par niveau. Une structure spatiale a été repérée pour ces deux sols au seuil de significativité de  $P > 0,05$ . Pour le podzsol (Figure 51-a), le signal est significatif pour la première classe de distance, soit 35 cm, pour le niveau le plus proche de la surface (5 cm). Les deux niveaux suivants (16 et 37 cm) ne sont pas significatifs avec le seuil de  $P > 0,05$  mais le seront avec  $P > 0,1$ . Le 4<sup>ème</sup> niveau (58 cm) montre, sur le corrélogramme, un signal plat (sub-nul), indiquant qu'il n'y a pas de structure spatiale même pour la première classe de distance. Les deux autres horizons plus profonds contenaient trop peu de charbons pour un traitement statistique.

Pour le sol calcaire (fig. 51-b), le niveau de surface (5 cm) a révélé une structure spatiale pour la première classe de distance : 35 cm. Il sera également significatif pour la deuxième classe de distance (70 cm) si le seuil est ramené à  $P > 0,1$ . Pour les classes et les horizons pédologiques suivants, aucun signal spatial n'a été détecté.

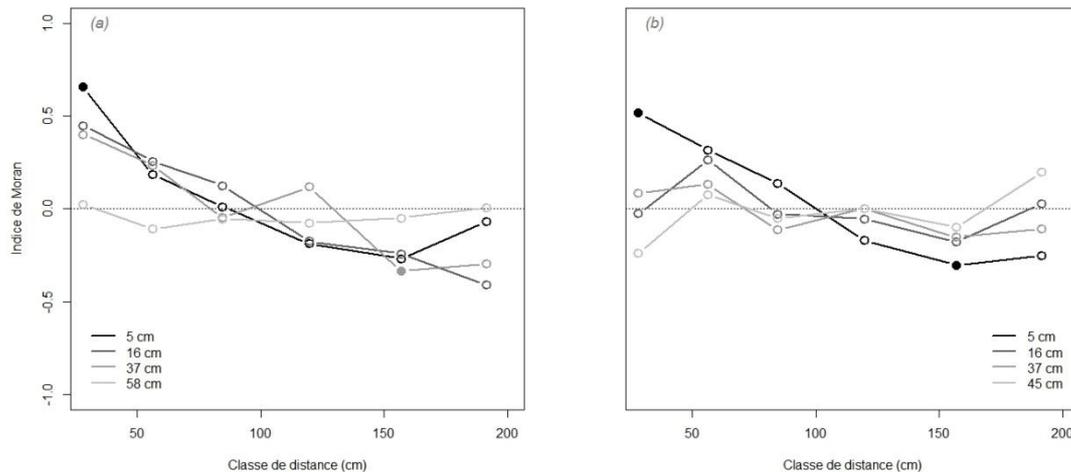


Figure 51 : Corrélogrammes des fosses podzosol (a) et sol calcaire (b) de Compiègne. L'indice I de Moran est calculé pour chaque horizon et à chaque classe de distance (35 cm). (o = non significatif, ● = significatif  $p < 0,05$ ).

### 3.3. Effort minimal d'échantillonnage

Les courbes de raréfaction ont été construites pour les trois sites de Compiègne. Nous allons illustrer ces résultats en présentant ci-dessous le cas du luvisol (Figure 52-a). La stabilisation de la richesse spécifique n'apparaît pas malgré les 479 charbons identifiés et les 62 L de prélèvements traités. Les indices de diversité sont :  $\alpha = 3,52$ ,  $\beta = 5,48$  et  $\gamma = 9,0$ . Si l'on représente les horizons de la fosse séparément, les intervalles de confiance se superposent, indiquant une diversité similaire entre les différentes profondeurs, hormis le niveau le plus profond qui est plus pauvre en charbons et en espèces. En ce qui concerne les prélèvements à la tarière (Figure 52-b), la courbe présente une asymptote à 570 charbons. La dendroflores carbonisée dans les 20 premiers centimètres du sol est représentative de la diversité locale. Les indices de diversité sont :  $\alpha = 3,52$ ,  $\beta = 3,48$  et  $\gamma = 7,0$ . Si on compare « fosse » *versus* « tarière », la fosse pédologique est plus riche en espèces (+2) et que des nouveaux taxons apparaissent dans les horizons profonds. Si l'on met en relation « tarière » avec la partie superficielle de la fosse (0-20 cm), les intervalles de confiance se superposent malgré une richesse supérieure (+1 espèce) et une vitesse d'accumulation des espèces plus rapide pour la partie haute de la fosse.

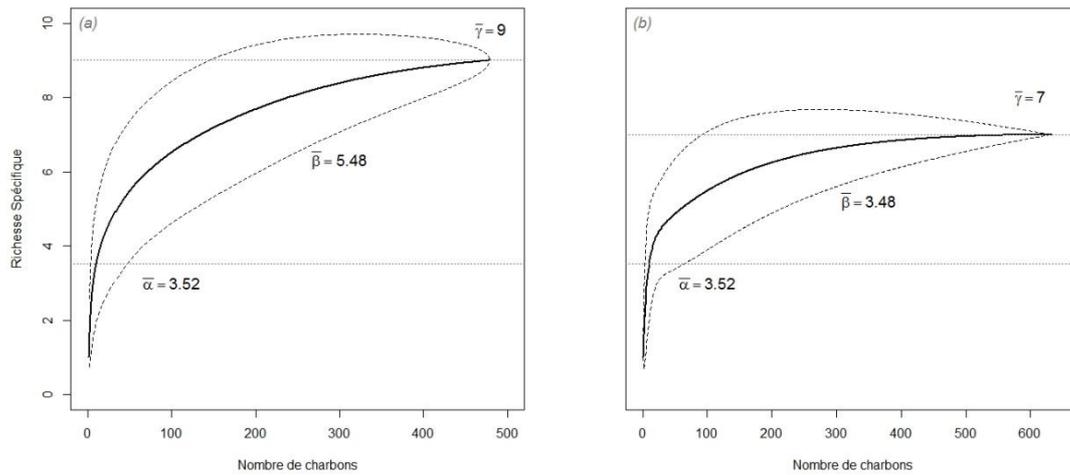


Figure 52 : Courbes de raréfaction et partition additive de la diversité pour le luvisol de Compiègne. (a) pour la fosse tous niveaux confondus, (b) pour les 30 tarières. Autour des courbes figure l'intervalle de confiance à 95%.

### 3.4. Datation $^{14}\text{C}$ de la forêt de Compiègne

Les dates obtenues couvrent une période de temps assez longue, du IX<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècles (Figure 53). Les trois charbons les plus anciens, de 894 à 1155 AD, appartiennent au taxon *Betula sp* et proviennent de deux sites différents (sol calcaire et podzsol).

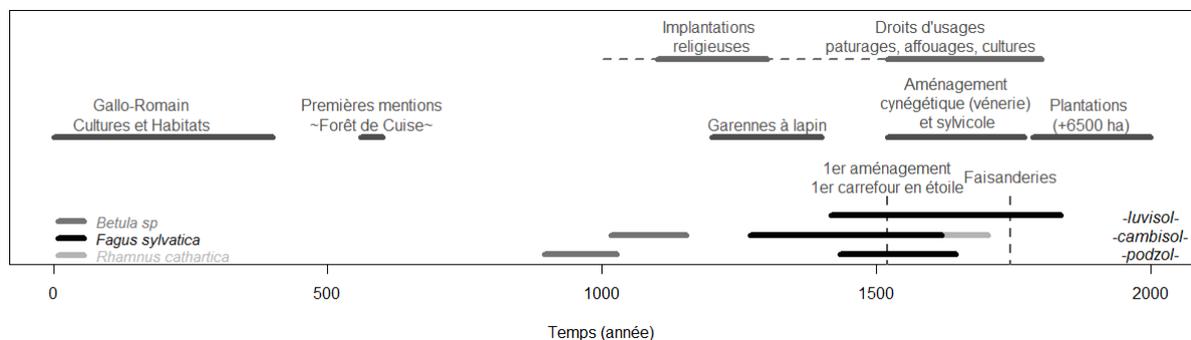


Figure 53 : Frise chronologique de l'histoire de la forêt de Compiègne depuis le I<sup>er</sup> siècle de notre ère. Sur la moitié supérieure, les faits historiques. Sur la moitié inférieure, les 15 datations  $^{14}\text{C}$  de charbon provenant des 3 sites de la forêt.

*Fagus sylvatica*, retrouvé dans les 3 sites, est présent durant plusieurs siècles : de 1271 à 1836 AD, accompagné de *Rhamnus cathartica* qui se place dans la période récente : de 1528 à 1705 AD.

## 4. Discussion

### Les valeurs d'anthracomasses

La forêt de St Gobain a révélé des quantités de charbons très élevées pour des sols forestiers (Figure 50). Seuls quelques auteurs, étudiant les évolutions des forêts alpines, montrent une

richesse voisine<sup>45</sup>. Pour la forêt de Compiègne, l'antracomasse est plus proche de ce qui est habituellement décrit dans la littérature pour des massifs forestiers<sup>46</sup>. L'antracomasse donne ainsi des indications sur l'ampleur des incendies passés sur un écosystème actuel. Elle peut même être employée pour comparer des systèmes entre eux et identifier où les traces des incendies passés sont les plus visibles.

#### **La distribution verticale des charbons dans les sols**

Pour tous les sites, le niveau de prélèvement pour lequel l'antracomasse est la plus élevée est le second depuis la surface (16 ou 20 cm selon les sols). Ce constat, clairement repéré dans les travaux de Goepp (2007), est souvent posé dans les travaux de pédoanthracologie où une accumulation est perçue à 20-40 cm de profondeur. Par ailleurs, il n'y a aucune corrélation entre la profondeur de prélèvement et la datation <sup>14</sup>C de nos charbons. Dans les sols, l'absence de stratification des charbons en fonction de leur âge, déjà constatée dans de nombreuses publications<sup>47</sup>, prouve que des spécimens datés dans des horizons similaires peuvent être radicalement différents (plusieurs siècles d'écart). La répartition verticale des végétaux carbonisés n'est donc pas seulement fonction du temps mais aussi des processus pédologiques et des bioturbations de type chablis, méga et macro faune...<sup>48</sup>.

#### **La distribution horizontale des charbons**

La structure spatiale des charbons en surface et dans les horizons d'une fosse est une question qui n'avait pas été traitée jusqu'ici. Quelques auteurs se sont intéressés à la distribution des espèces carbonisées dans les horizons de surface, à une échelle allant jusqu'au mètre et juste après le passage de l'incendie<sup>49</sup>. Ils ont notamment montré la difficulté de reconstituer le paysage forestier post-incendie, car la répartition des charbons est soumise à différents paramètres déterminants, à savoir : l'emplacement des arbres et des espèces dans la parcelle, la nature du feu (sous-étage, canopée, bois mort) et l'intensité de la combustion. Cette source primaire d'hétérogénéité peut expliquer l'absence de structure spatiale des antracomasses, démontrée pour nos prélèvements de surface réalisés avec un espacement de 5 m.

Cette hétérogénéité a également été mise en évidence dans d'autres travaux pour des espacements supérieurs (50 m) et des surfaces plus importantes (2500 ou 5000 m<sup>2</sup>)<sup>50</sup>.

En revanche, grâce à l'échantillonnage par litre au sein des horizons nous avons montré que c'est à une échelle très fine, de 35 ou 70 cm selon le site, qu'une structure spatiale des antracomasses peut être retrouvée en surface. Au-delà de 35-70 cm, la distribution des charbons devient aléatoire.

Les indices de Moran révèlent également que cette structure spatiale observée pour les horizons de surface n'est plus détectable pour les horizons profonds. Ainsi, à l'hétérogénéité primaire s'ajoute une hétérogénéité secondaire, d'origine édaphique, pour laquelle la bioturbation pourrait avoir un rôle déterminant.

<sup>45</sup> COMPOSTELLA 2012 ; TOUFLAN 2009

<sup>46</sup> CARCAILLET 2001 ; CUNILL 2012 ; GOEPP 2007 ; ROBIN 2012 ; TOUFLAN 2009

<sup>47</sup> CARCAILLET 1996 ; GOEPP 2007

<sup>48</sup> LANGHOR 2000 ; SCHEU 1987

<sup>49</sup> PAYETTE 2008 ; ASSELIN 2005

<sup>50</sup> TOUFLAN 2009, 2010, TALON 2005 ; ROBIN 2012

### **L'effort d'échantillonnage et la représentativité statistique**

Le protocole proposé par Thinon (1992) et Carcaillet *et al.* (1996) s'inspire de ceux conçus par les archéologues. Les fondateurs de la pédoanthracologie proposent de prélever, selon la richesse constatée en charbons d'un sol, 5 à 10 L par horizon, ce qui représente, selon la nature pédologique du site, 7 à 15 kg de matière. Quasiment toutes les études pédoanthracologiques<sup>51</sup>, des années 1990 à nos jours, emploient cette méthode et se réfèrent aux quantités de prélèvements conseillées. D'autres travaux, plus récents, adaptent cette quantité de prélèvement à un effort fixe de 10 L par horizon et déterminent également, pour la première fois, une quantité de charbons à identifier au microscope (90 par horizon)<sup>52</sup>. Cette quantité recommandée s'appuie sur leur expérience dans la discipline. Ces modifications protocolaires s'expliquent par la volonté d'explorer des sites toujours plus grands, d'appréhender la variation spatiale et d'économiser un temps conséquent d'extraction et d'identification.

Pour notre part, nous avons utilisé les courbes de raréfaction pour confronter les efforts d'échantillonnages à une réalité statistique robuste. Les volumes extraits et traités pour les sites de la forêt de Compiègne (20 L par horizon) n'ont pas permis d'atteindre d'asymptote et d'être ainsi représentatifs de la diversité ligneuse carbonisée de ces sols. Bien que nous ayons prélevé des volumes déjà bien supérieurs au volume conseillé dans la littérature pédoanthracologique, il est encore nécessaire d'augmenter cet effort pour tenter de trouver une stabilisation de la richesse spécifique, celle-ci ne pouvant croître indéfiniment puisque « plafonnée » par la taille du réservoir local d'espèces. L'utilisation de la partition additive de la diversité conduit à adapter cette hausse de l'échantillonnage selon les horizons, en fonction de la diversité  $\beta$ . Plus cette dernière est importante (en l'absence d'asymptote) et plus l'effort devra être important, la diversité floristique conditionnant l'échantillonnage. Pour le luvisol, une quantité de plus de 25 kg par niveau devrait suffire à capter le potentiel floristique carbonisé des niveaux de surface. Les niveaux de fond sont si pauvres en charbons et en espèces que les 20 L sont suffisants. Il est toutefois impossible d'en dériver une diversité floristique représentative. Au sein des horizons, les anthracomasses varient selon le litre prélevé et cette nature aléatoire et hétérogène rend la capture de tout le potentiel anthracologique difficile.

L'échantillonnage pédoanthracologique par tarière est très peu répandu puisque utilisé seulement dans Talon *et al.* (2005), de la manière suivante : 20 x 0.75 L pour 1000 m<sup>2</sup>. Le principal atout de cette méthode est la rapidité de l'échantillonnage sur une grande surface. Cette manière opératoire doit aussi être confrontée à sa représentativité statistique. Avec nos 30 relevés de 1 L pour 1000 m<sup>2</sup>, nous avons pu atteindre une asymptote dans le cas du luvisol, riche en charbons ( $n= 632$ ) mais pauvre en espèces ( $S= 7$ ). Il est donc possible de saisir une image fiable de la diversité ligneuse carbonisée contenue dans les horizons de surface d'un sol par cette méthode.

Il est important de préciser que la diversité anthracologique est systématiquement supérieure dans les fosses puisque la densité de prélèvement y est plus forte et que les horizons profonds y sont étudiés. Dans le niveau supérieur de la fosse, la richesse spécifique

<sup>51</sup> ALI 2005 ; BERGAGLIO 2006 ; DEHLON 2005 ; DUTOIT 2009...

<sup>52</sup> ROBIN 2013

mesurée est égale ou supérieure d'une espèce à celle des tarières, mais le nombre de charbons y est inférieur, ce qui rend difficile l'obtention d'une asymptote. La différence de diversité floristique et d'antracomasse entre fosse, niveau supérieur de la fosse et tarière n'est donc pas induite par la surface de l'échantillonnage, puisque les prélèvements à la tarière couvrent une surface bien plus grande (1000 m<sup>2</sup>) que celle des fosses (2,25 m<sup>2</sup>). En revanche c'est le volume et la densité d'échantillonnage au m<sup>2</sup> qui influent de manière significative sur la richesse spécifique des relevés anthracologiques.

### **Datation <sup>14</sup>C et événements historiques sur Compiègne.**

Les 3 dates les plus anciennes appartiennent au taxon *Betula sp.* Ils correspondent au début de la période de règlementation des droits d'usages en forêt. La présence de cette espèce nous permet d'envisager un contexte de recolonisation forestière et d'extension du massif à cette période. En revanche, il n'y a pas de charbons pour le début du Moyen Âge et la période antique, mais la forte densité des sites gallo-romains dans la forêt de Compiègne (voie romaine, *villae*) laissent penser qu'à cette époque la forêt était absente.

Les 11 dates de *Fagus sylvatica* sont concentrées sur six siècles. Leurs présences sont corrélées avec de nombreux aménagements et pratiques humaines en milieu forestier où l'homme exerce une pression forte par un modelage intense du paysage (constructions, vénerie, sylviculture...).

L'absence de trace de feux à partir du XIX<sup>e</sup> siècle est à mettre en lien avec l'évolution des politiques et des pratiques forestières et, notamment, la défense des forêts contre les incendies.

## **5. Conclusion**

La pédoanthracologie est une discipline récente qui offre un fort potentiel dans la reconstitution des écosystèmes passés. Néanmoins, les travaux antérieurs décrivent d'importantes variations dans l'espace des profils pédoanthracologiques<sup>53</sup>, soulignant ainsi la nécessité d'apporter de nouveaux éléments méthodologiques, en particulier concernant l'effort d'échantillonnage nécessaire pour s'assurer de la représentativité statistique des données.

Les indices de Moran ont montré que la distribution des charbons de bois est aléatoire entre les prélèvements à une distance de 5 m. Ils mettent néanmoins en évidence une structure spatiale de l'antracomasse de surface à une échelle très fine, de 35 à 70 cm selon les sites étudiés. C'est à cette échelle que les résultats sont extrapolables avec certitude. Au-delà de cet intervalle, la répartition des charbons est aléatoire. Pour l'ensemble des profils, cette structure spatiale fine disparaît en profondeur, suggérant que les processus pédologiques conduisent à une dispersion des charbons au sein du profil. L'activité biologique des sols pourrait avoir un rôle déterminant dans cette perte de signal.

Les datations <sup>14</sup>C réalisées sur les trois sites du massif de Compiègne montrent une distribution en âge sans relation avec la profondeur, renforçant l'hypothèse d'un brassage

---

<sup>53</sup> TALON 2005 ; TOUFLAN 2008 ; ROBIN 2012

biologique important. Les informations âge/espèces obtenues pour ce massif sont cohérentes avec l'histoire de l'occupation de celui-ci.

Après identification des charbons, la répartition de la diversité a pu être étudiée. Les résultats montrent que les fosses pédologiques constituent le meilleur moyen de relever la plus grande richesse spécifique. En revanche, l'asymptote n'étant pas atteinte sur les courbes de raréfaction, les résultats montrent que tout le potentiel d'espèces n'a pas été statistiquement recueilli dans les différents horizons. L'effort d'échantillonnage, bien que supérieur à celui pratiqué classiquement, semble encore insuffisant. En revanche, pour les niveaux de fond (>40 cm), très pauvres en charbons et en espèces, un effort d'échantillonnage plus grand s'avère inutile car pour atteindre un seuil de représentativité il faudrait prélever une quantité invraisemblable de terre. L'indice de diversité  $\beta$  a été d'une aide précieuse pour adapter l'effort d'échantillonnage en fonction des horizons et de la richesse contenue. Plus cet indice est fort et plus l'effort devra être important.

Les prélèvements à la tarière pourraient constituer un moyen simple et rapide de relever la diversité floristique pour les horizons de surface (0-20 cm). Néanmoins, un seul site sur les trois étudiés montre des données statistiquement représentatives. Là encore, un effort d'échantillonnage supérieur s'avère nécessaire dans les deux autres cas.

On notera que, dans un protocole d'échantillonnage de pédoanthracologie, la densité de prélèvement au m<sup>2</sup>, influencera la richesse spécifique obtenue plus que la surface de prospection. Ceci a été démontré par une diversité floristique systématiquement plus forte dans la fosse, ou dans la partie superficielle de celle-ci, que dans les tarières.

## Remerciements

Les auteurs remercient Claire Dehlon et Marie-Claude Bal-Serin pour leur aide et leurs conseils en pédoanthracologie, ainsi que le Ministère de l'Enseignement et de la Recherche pour le financement de la thèse de Thomas Feiss.

## Références.

- ALI A.A., CARCAILLET C., « *Pinus cembra* L. (Arolla pine), a common tree in the inner French Alps since the early Holocene and above the present tree line: a synthesis based on charcoal data from soils and travertines: Palaeoecology of *Pinus cembra* in the French Alps », *Journal of Biogeography*, 32, 2005a-b, p. 1659–1669.
- ASSELIN H., PAYETTE S., « Late Holocene deforestation of a tree line site: estimation of pre-fire vegetation composition and black spruce cover using soil charcoal », *Ecography*, 28, 2005, p. 801–805.
- BERGAGLIO M., TALON B., « Histoire et dynamique des forêts de l'ubac du massif des Maures au cours des derniers 8000 ans », *Forêt méditerranéenne*, 27, 2006, p. 3–16.
- BURIDANT J., *Les espaces Laonnais (début XVII<sup>e</sup> – début XIX<sup>e</sup> siècle). Hommes, environnements et paysages à l'époque pré-industrielle*, Université de Paris IV – Sorbonne, 1999.
- CARCAILLET C., THINON M., « Pedoanthracological contribution to the study of the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps): methodology and preliminary data », *Review of palaeobotany and Palynology*, 91, 1996, p. 399-416.

- CARCAILLET C., « Soil particles reworking evidences by AMS 14 C dating of charcoal » dans *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 332, 2001, p. 21–28.
- COMPOSTELLA C., TROMBINO L., « Late Holocene soil evolution and treeline fluctuations in the Northern Apennine », *Quaternary International*, 289, 2013, p. 46-59.
- CUNILL R., SORIANO J.-M., « Holocene treeline changes on the south slope of the Pyrenees: a pedoanthracological analysis », *Vegetation History and Archaeobotany*, 21, 2012, p. 373-384.
- DAMBRINE E., DUPOUEY J.-L., « Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture », *Ecology*, 88, 2007, p. 1430–1439.
- DECOCQ G., AUBERT M., « Plant diversity in a managed temperate deciduous forest: understorey response to two silvicultural systems », *Journal of Applied Ecology*, 41, 2004, p. 1065–1079.
- DELHON C., THIÉBAULT S., « The migration of beech (*Fagus sylvatica* L.) up the Rhone: the Mediterranean history of a “mountain” species », *Vegetation History and Archaeobotany*, 14, 2005, p. 119–132.
- DUCHAUFOUR P., *Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement*, Paris, 2001.
- DUPOUEY J.-L., DAMBRINE E., « Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity », *Ecology*, 83, 2002, p. 2978–2984.
- DUTOIT T., THINON M., « Sampling soil wood charcoals at a high spatial resolution: a new methodology to investigate the origin of grassland plant communities », *Journal of Vegetation Science*, 20, 2009, p. 349–358.
- GOEPP S., *Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme*, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2007.
- HERMY M., VERHEYEN K., « Legacies of the past in the present-day forest biodiversity: a review of past land-use effects on forest plant species composition and diversity », *Ecological Research*, 22, 2007, p. 361–371.
- KARJALAINEN T., SPIECKER H., « Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe: proceedings of the international seminar held in Nancy, France 14-16 May 1998 » dans *European Forest Institute, Joensuu, Finland*, 1998.
- LANGHOR R., « Tree sway turbation of soils as observed on archaeological sites in the sandy area of northern Flanders », Belgium, *Pedologie-Themata*, 8, 2000, p. 123-129.
- LOWE J.J., « Three Flandrian pollen profiles from the Teith Valley, Perthshire, Scotland », *New Phytologist*, 90, 1982, p. 371–385.
- MARGUERIE D., HUNOT J.-Y., « Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France », *Journal of Archaeological Science*, 34, 2007, p. 1417–1433.
- PAYETTE S., FILION L., « Spatially explicit fire-climate history of the boreal forest-tundra (Eastern Canada) over the last 2000 years », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363, 2008, p. 2299–2314.
- PLUE J., HERMY M., « Persistent changes in forest vegetation and seed bank 1 600 years after human occupation », *Landscape Ecology*, 23, 2008, p. 673–688.
- R Core Team, « R: A language and environment for statistical computing », *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria, 2014.
- ROBIN V., RICKERT B.-H., « Assessing Holocene vegetation and fire history by a multiproxy approach: The case of Stodthagen Forest (northern Germany) », *The Holocene*, 22, 2011, p. 337-346.

- ROBIN V., TALON B., « Pedoanthracological contribution to forest naturalness assessment », *Quaternary International*, 289, 2013a, p. 78-87.
- SCHEU S., « The role of substrate feeding earthworms (*Lumbricidae*) for bioturbation in a beechwood soil, *Oecologia* », 72, 1987, p. 192-196.
- SCHWEINGRUBER F.H., *Anatomy of European Woods*. Bern, Stuttgart, 1990a.
- SCHWEINGRUBER F.H., *Microscopic Wood Anatomy*, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, 1990b.
- TALON B., CARCAILLET C., « Études pédoanthracologiques des variations de la limite supérieure des arbres au cours de l'Holocène dans les Alpes françaises », *Géographie physique et Quaternaire*, 52, 1998, p. 195.
- TALON B., PAYETTE S., « Reconstruction of the long-term fire history of an old-growth deciduous forest in Southern Québec, Canada, from charred wood in mineral soils », *Quaternary Research*, 64, 2005, p. 36–43.
- THINON M., *L'analyse pédoanthracologique. Aspects méthodologiques et applications*, Université d'Aix-Marseille, 1992.
- TOUFLAN P., TALON B., « Étude pédoanthracologique à haute résolution spatiale de l'histoire holocène d'une forêt subalpine (Alpes du Sud, France) », *Ecologia Mediterranea*, 34, 2008, p. 13-23.
- TOUFLAN P., TALON B., « Spatial Reliability of Soil Charcoal Analysis: The Case of Subalpine Forest Soils », *Ecoscience*, 16, 2009, p. 23–27.
- TOUFLAN P., TALON B., « Soil charcoal analysis: a reliable tool for spatially precise studies of past forest dynamics: a case study in the French southern Alps », *The Holocene*, 20, 2010, p. 45–52.
- VALLAURI D., GRELL A., « Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles » dans *Rapport WWF/INRA*, Marseille, 64, 2012.

## Appendice 2

---

### Rappel des différents étages paléoclimatologiques.

-1000 ans	<b>Subatlantique</b>
-2000 ans	
-3000 ans	<b>Subboréal</b>
-4000 ans	
-5000 ans	<i>récent</i>
-6000 ans	
-7000 ans	<b>Atlantique</b>
-8000 ans	
-9000 ans	<i>ancien</i>
-10 000 ans	
-11 000 ans	<b>Boréal</b>
-12 000 ans	<b>Préboréal</b>
-13 000 ans	<b>Dryas récent</b>
	<b>Allerod</b>
	<b>Bolling</b>

## Appendice 3

Plantes préconisées pour les garennes dans les anciens traités d'agronomie					
	Estienne et Liébault	Serres O.	Liger L.	Bastien J.F.	Baudrillart
	1583	1600	1700	1798	1834
Amandier		x			
Aubépine					x
Azerolier					x
Bouleau					x
Buisson ardent					x
Cerisier		x			x
Chêne		x			x
Cognassier		x			x
Cormier		x			x
Cornouiller		x			
Cytise					x
Fraisier			x		
Framboisier	x		x	x	
Genêt			x	x	
Genévrier	x	x	x	x	x
Groseillier			x	x	
Houx					x
Mûrier	x	x	x	x	x
Noisetier		x			x
Orme		x			x
Pinastre	x				
Poirier		x			x
Pommier		x			x
Prunellier	x		x	x	
Prunier		x			
Robinier					x
Romarin				x	
Ronce	x				
Saule marsault					x
Spirée					x
Sureau					x
Viorne					x

# Appendice 4

## Distributions spatiales des anthracomasses par horizon et par sol pour Saint Gobain ainsi que pour le cambisol et le luvisol de Compiègne.

### Le podzol de Saint Gobain

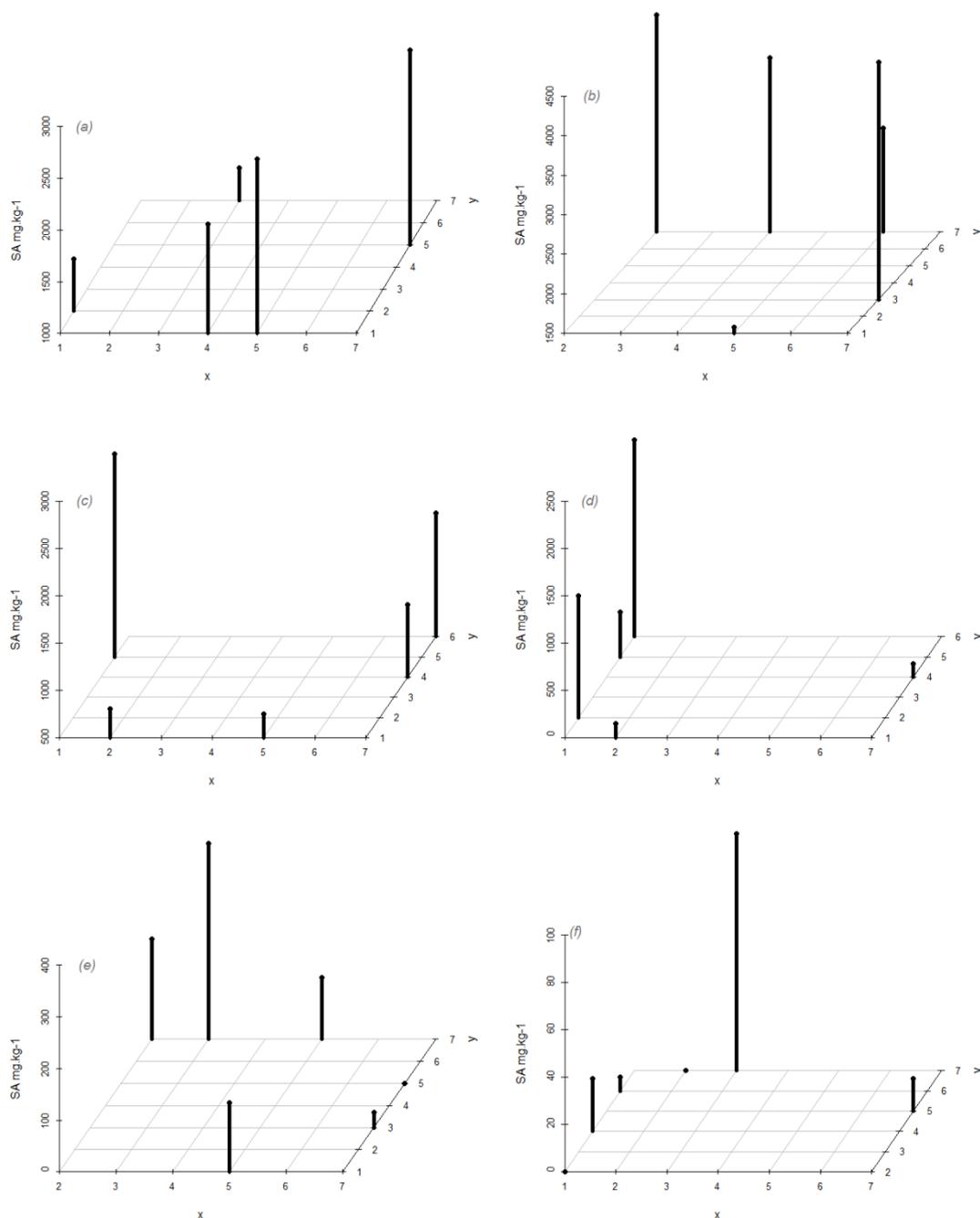


Figure 54 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 6 niveaux de la fosse du podzol de Saint Gobain. (a) pour 5 cm, (b) pour 20 cm, (c) pour 30 cm, (d) pour 50 cm, (e) pour 70 cm et (f) pour 100 cm.

### Le cambisol de Saint Gobain

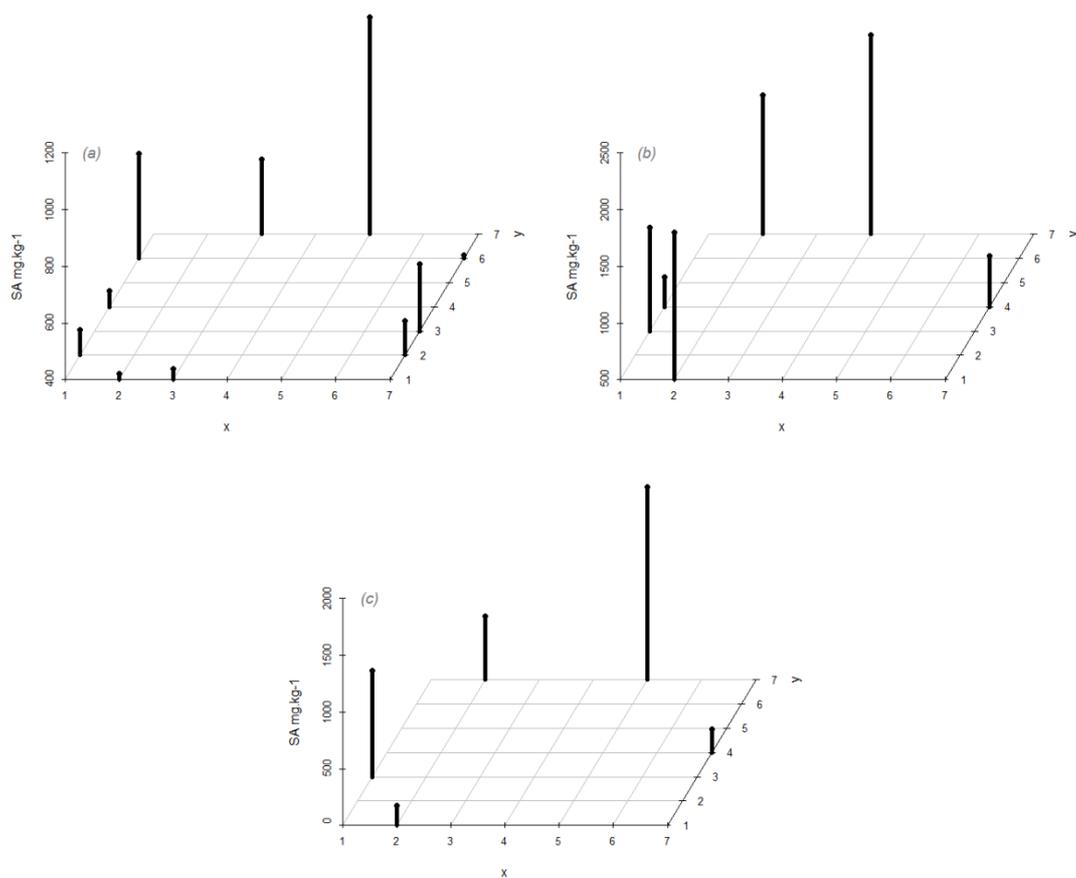


Figure 55 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 3 niveaux de la fosse du cambisol de St Gobain. (a) pour 10 cm, (b) pour 25 cm et (c) pour 40 cm.

## Le luvisol de Saint Gobain

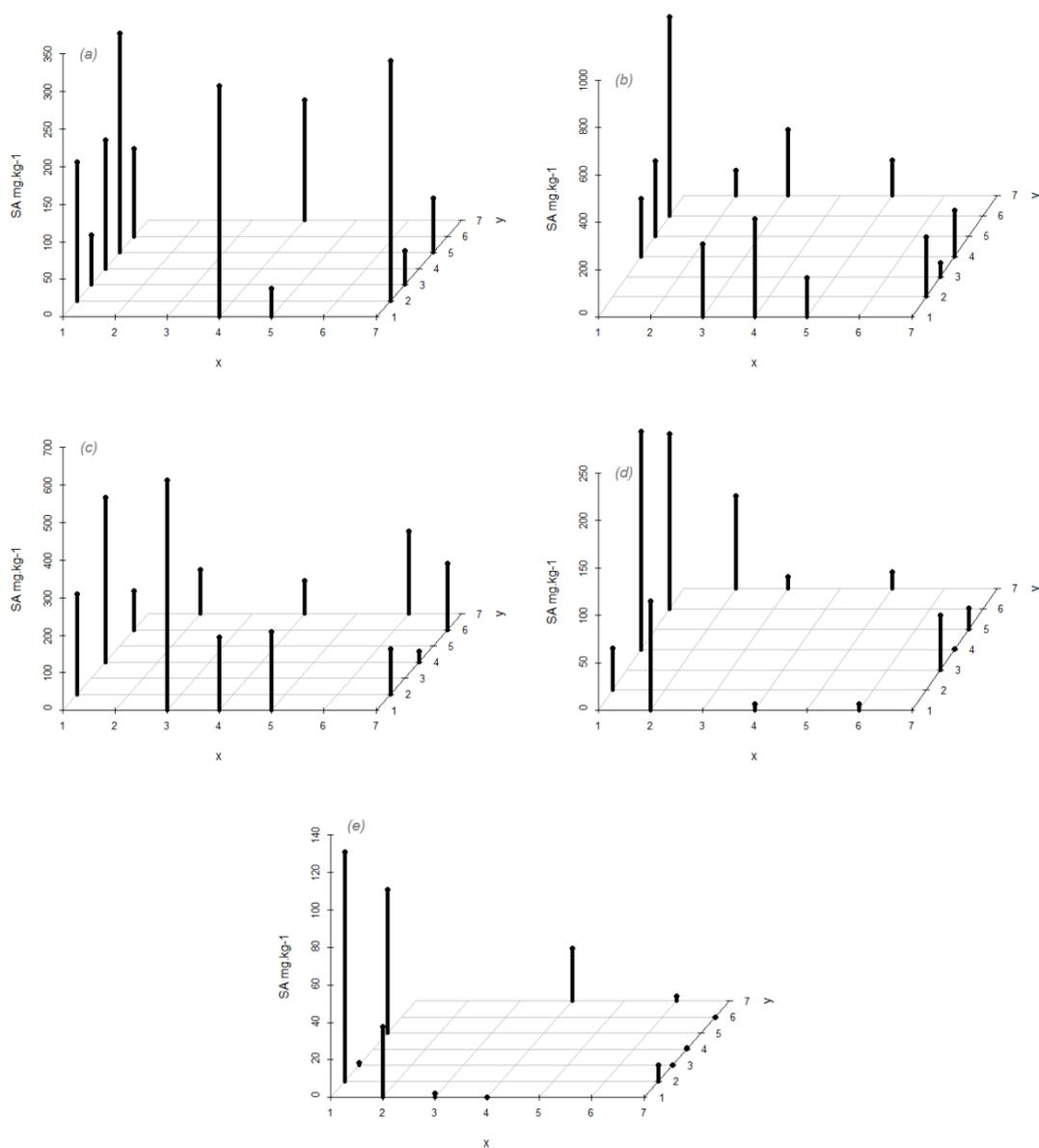


Figure 56 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 5 niveaux de la fosse du luvisol de Saint Gobain. (a) pour 5 cm, (b) pour 15 cm, (c) pour 35 cm, (d) pour 57 cm et (e) pour 85 cm.

## Le cambisol de Compiègne

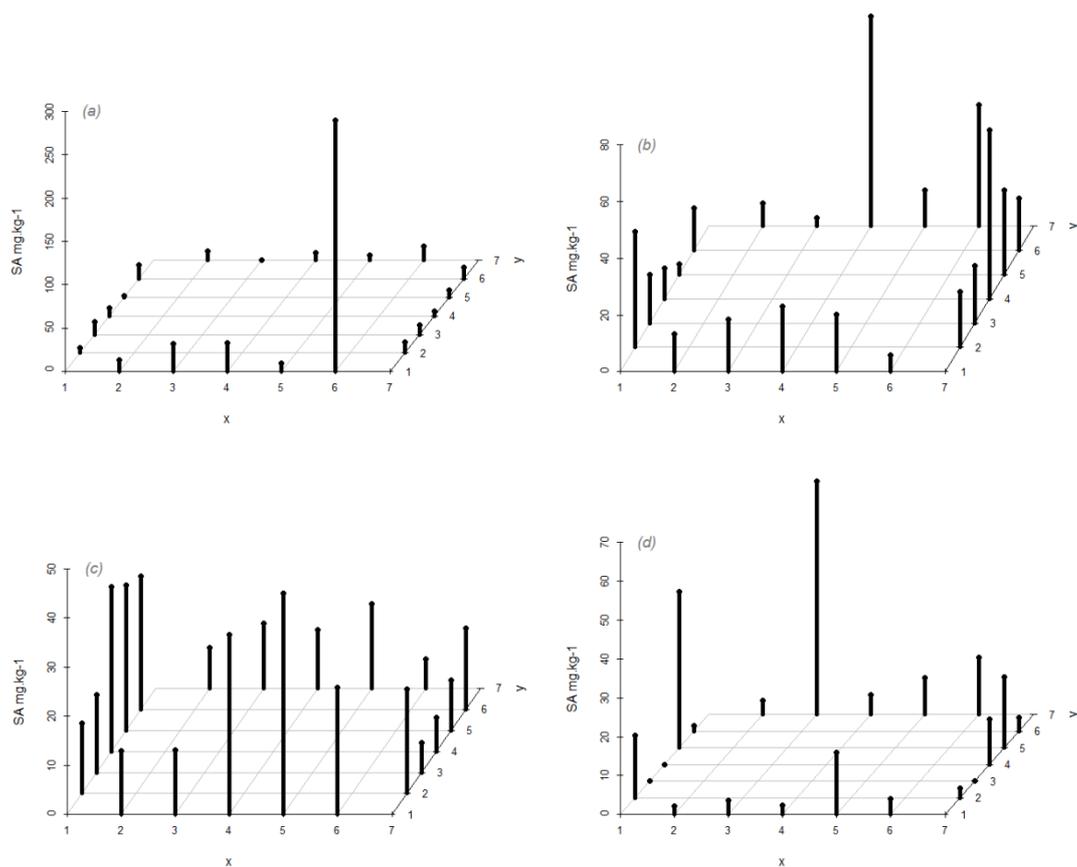


Figure 57 : Distribution des valeurs des anthracomasses selon les 4 faces et les 4 horizons de la fosse du cambisol de Compiègne. (a) pour 5 cm, (b) pour 16 cm, (c) pour 37 cm et (d) pour 45 cm.



# Appendice 5

## Données complémentaires concernant le traitement spatial des anthracomasses.

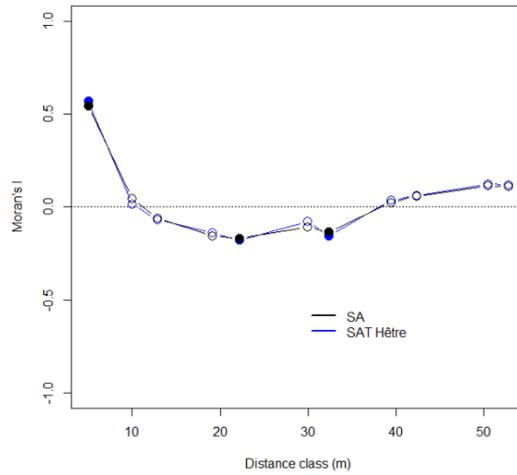


Figure 59 : Correlogramme concernant le test d'autocorrélation spatiale de la distribution des anthracomasses des tarières du luvisol de Compiègne pour l'anthracomasse globale (SA) (courbe noire) et pour l'anthracomasse spécifique du taxon *Fagus* (courbe bleue). (○= non significatif, ●= significatif  $p < 0.3$ )

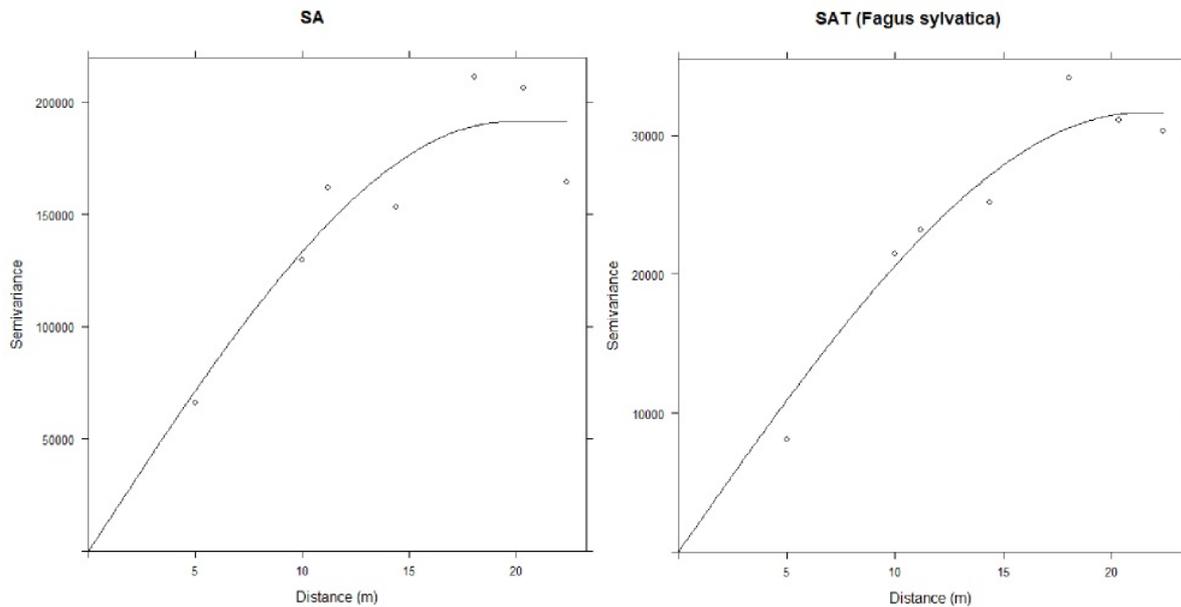


Figure 60 : Semi-variogrammes pour l'anthracomasse (SA à gauche) et l'anthracomasse spécifique du hêtre (*Fagus sylvatica*) (SAT à droite) construits à partir des tarières du luvisol de Compiègne.

# Appendice 6

---

## Répartition des taxons selon les faces des fosses

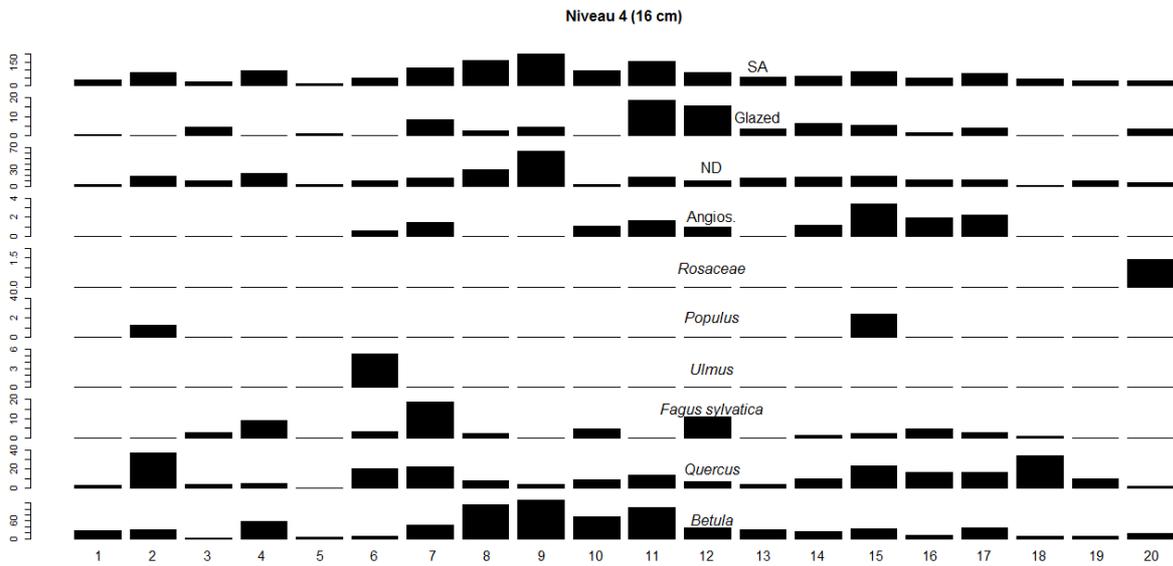
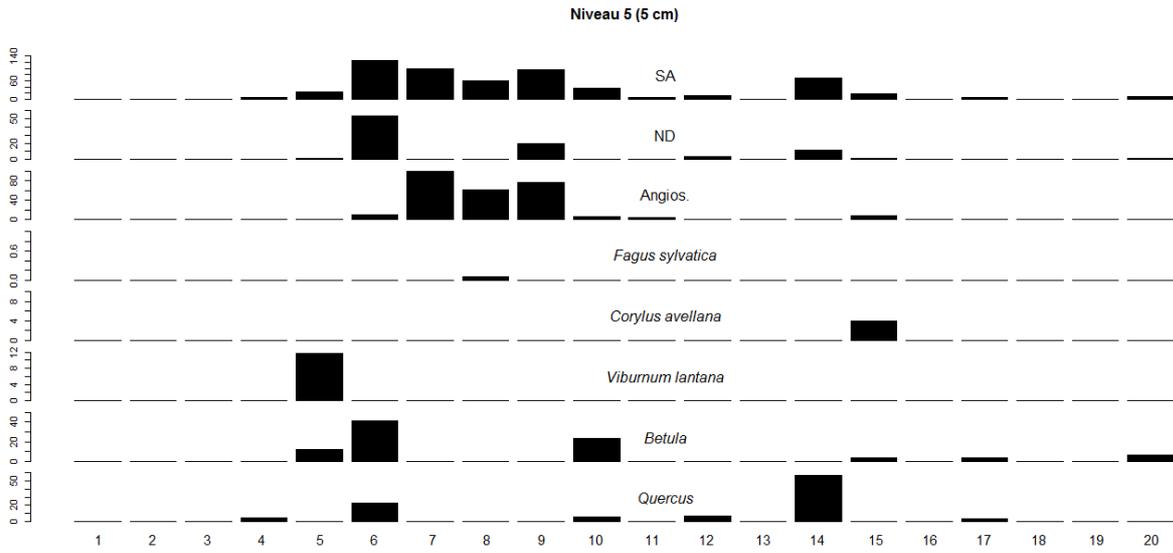
Cet appendice propose de visualiser la distribution spatiale des taxons au sein des fosses, autrement dit entre voisins séparés de quelques centimètres. Nous ferons appel aux diagrammes anthracologiques créés pour chaque niveau de prélèvements des trois sites (figures 54 à 56).

Les 14 diagrammes, représentant chacun un horizon pédologique échantillonné, sont représentés ci-dessous. De même que pour la distribution des anthracomasses, on constate, dans chacun des cas, une forte hétérogénéité taxonomique entre les prélèvements d'un même horizon et d'une même face de la fosse. Les espèces sont donc distribuées de manière aléatoire dans l'espace. Certains taxons se manifestent uniquement sur 1 ou 2 prélèvements d'un même horizon. D'autres apparaissent et disparaissent en fonction des couches pédologiques. En revanche, les taxons dominant les assemblages restent les mêmes dans les niveaux situés entre 0 et 40 cm. Pour le podzol, il s'agit du duo *Betula – Quercus* ; *Fagus sylvatica – Betula* pour le cambisol et *Carpinus betulus – Fagus sylvatica* dans le cas du luvisol.

En-dessous de ce seuil des 40 cm, un appauvrissement significatif de la richesse apparaît avec très peu de nouvelles espèces découvertes et une dominance de la catégorie ND (Non Déterminable). Les charbons de fond de fosse sont petits (0.8 mm), très fragmentés et quasi systématiquement très dégradés.

*Attention : en raison de leur taille, les figures sont découpées sur plusieurs pages. A noter que les échelles d'anthracomasses en ordonnées changent en fonction des taxons.*

## Le podzol de Compiègne



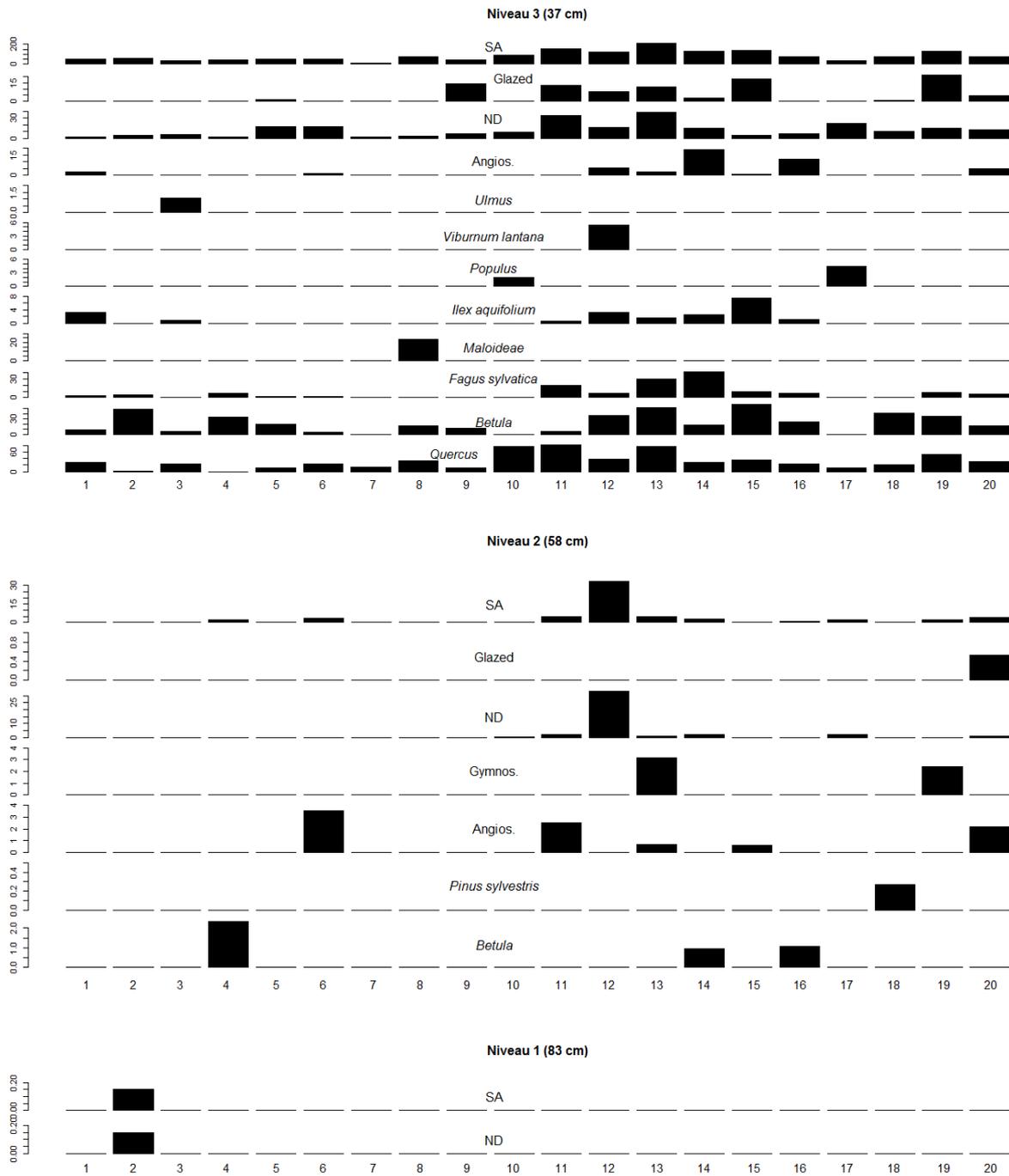
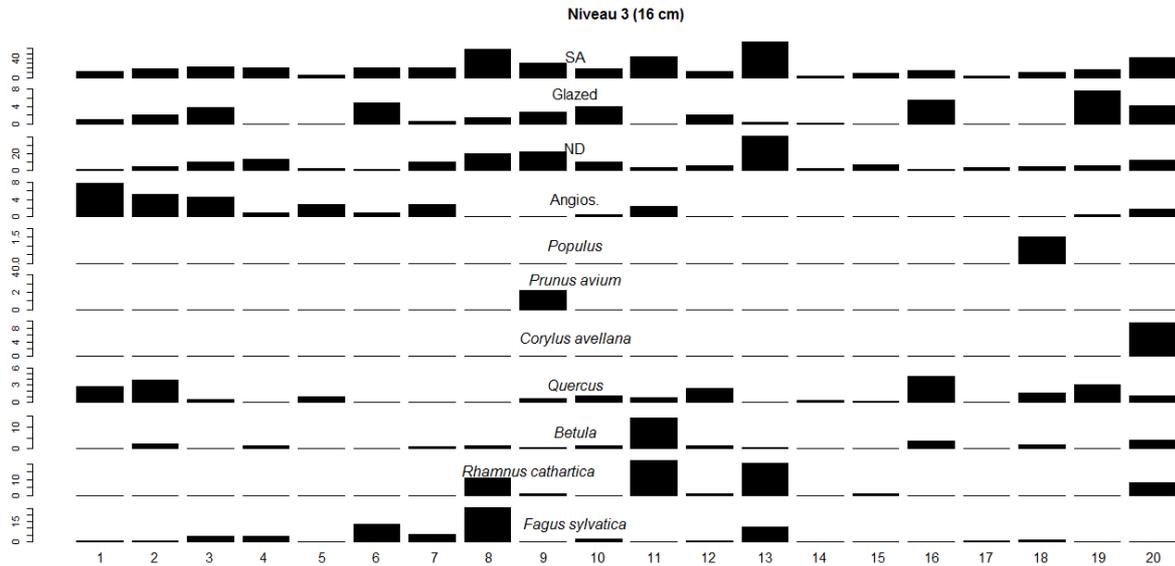
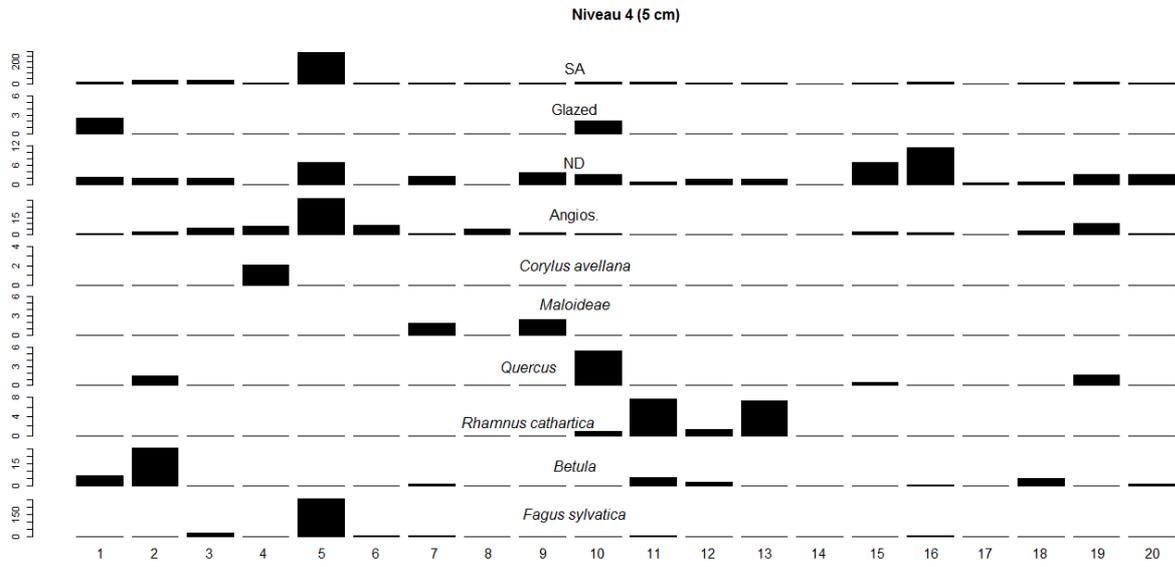


Figure 61 : Diagrammes anthracologiques des 5 niveaux pour la fosse du podzol de Compiègne. En abscisse le nombre de litres traités et en ordonnée l'antracomasse spécifique (mg.kg<sup>-1</sup>) de chaque catégorie.

## Le cambisol de Compiègne



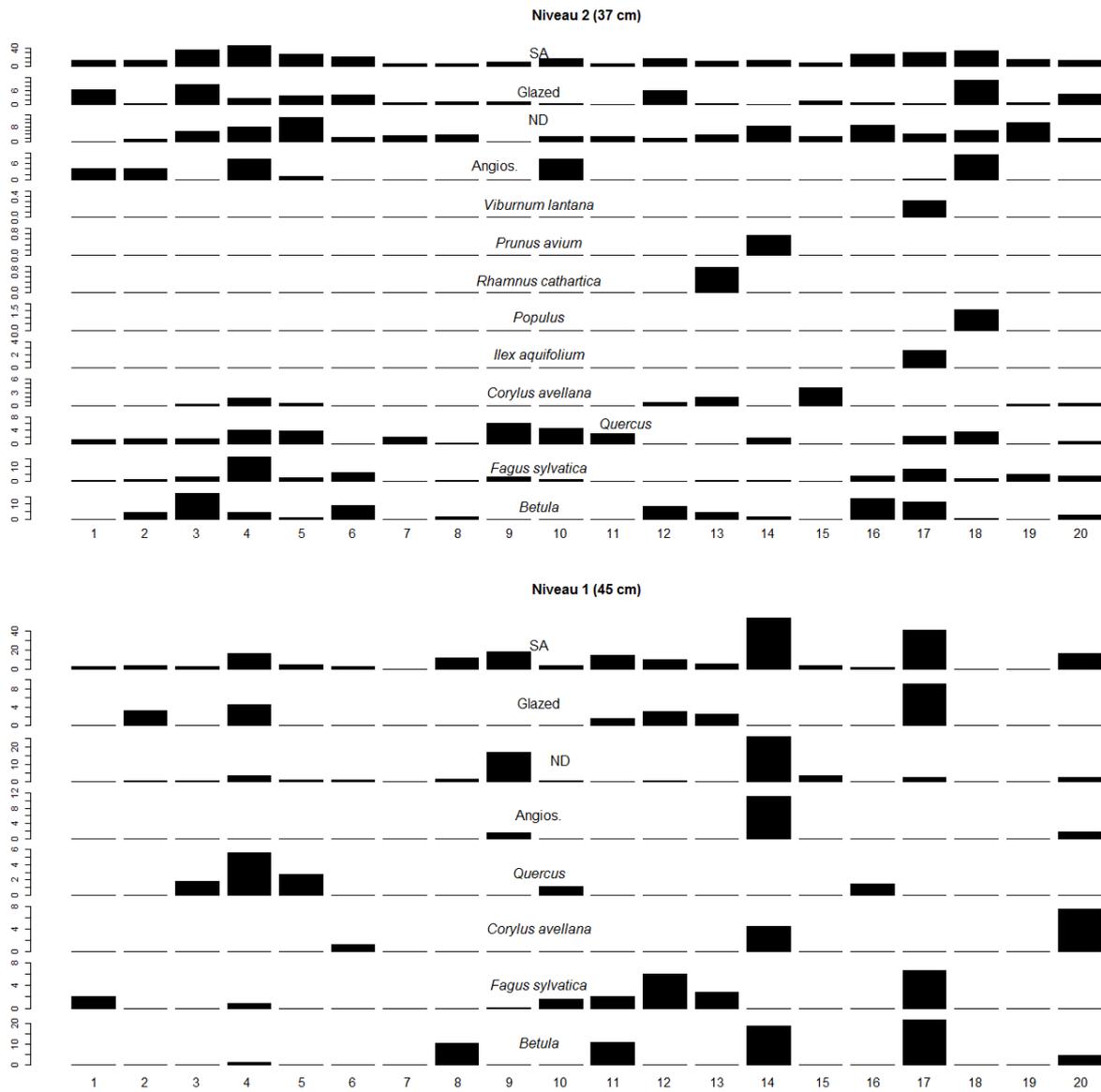
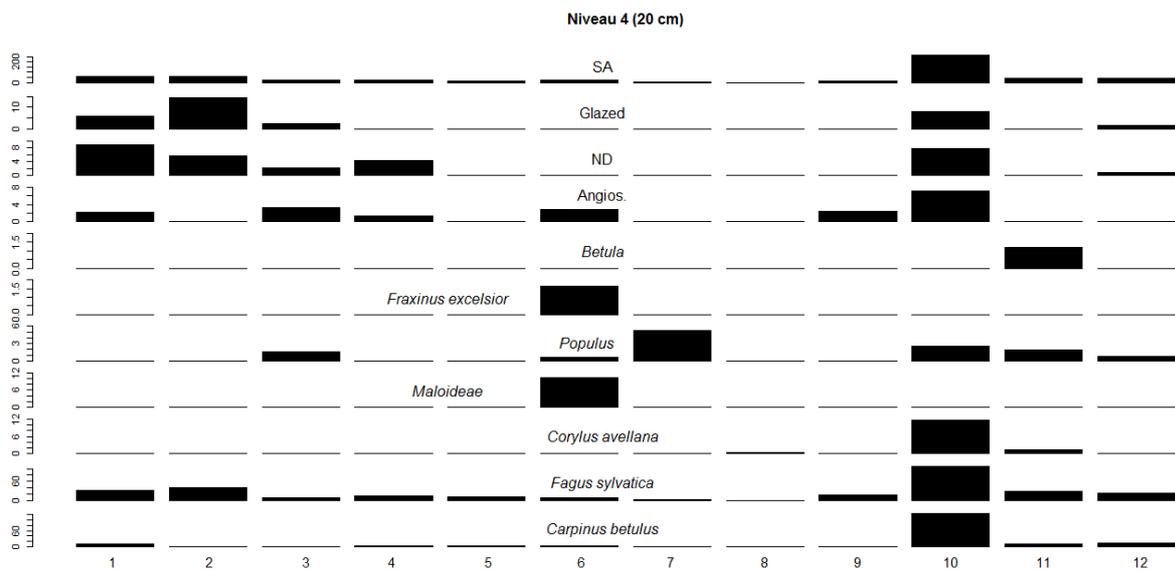
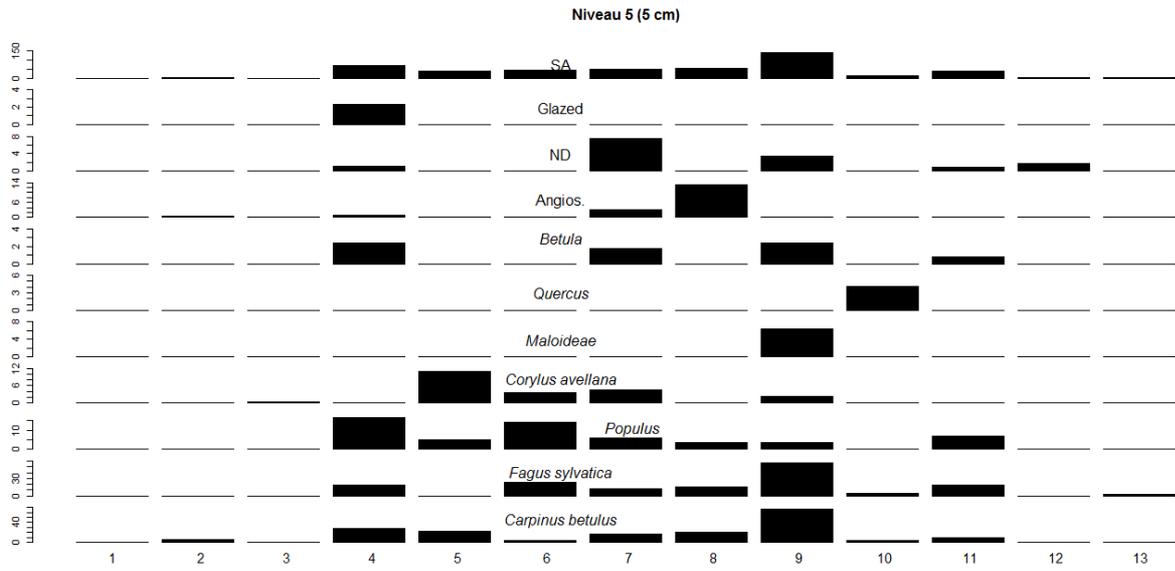


Figure 62 : Diagrammes anthracologiques des 4 niveaux pour la fosse du cambisol de Compiègne. En abscisse le nombre de litres traités et en ordonnée l’antracomasse spécifique (mg.kg-1) de chaque catégorie.

Le luvisol de Compiègne



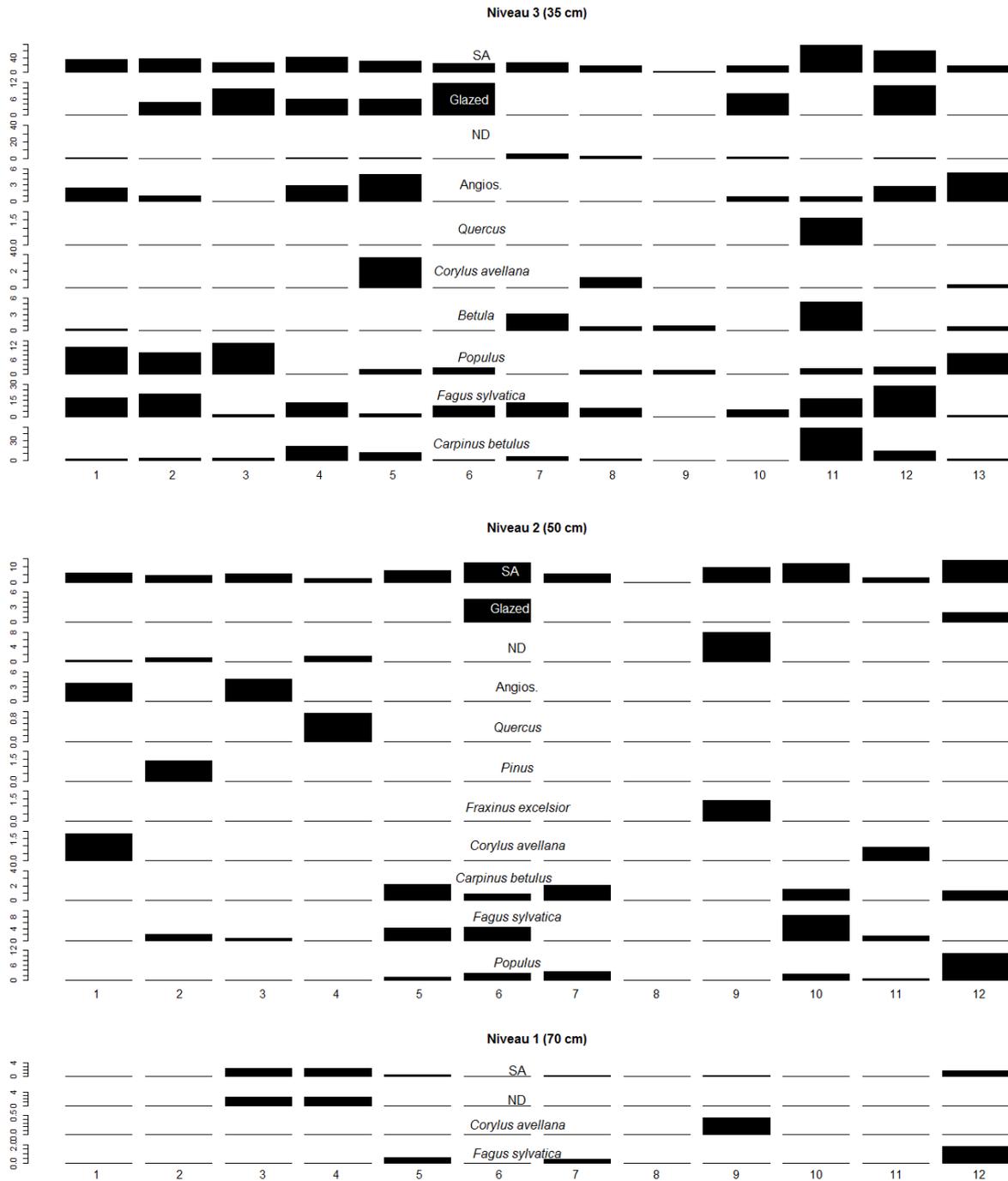


Figure 63 : Diagrammes anthracologiques des 5 niveaux pour la fosse du luvisol de Compiègne. En abscisse le nombre de litres traités et en ordonnée l'antracomasse spécifique (mg.kg<sup>-1</sup>) de chaque catégorie.