



Pédoanthracologie : approche méthodologique et statistique. Mieux appréhender l'histoire et l'exploitation anthropique passée des sols forestiers.

Thomas Feiss, Hélène Horen, Boris Brasseur, Jonathan Roger Michel Henri Lenoir, Jérôme Buridant, Guillaume Decocq

► To cite this version:

Thomas Feiss, Hélène Horen, Boris Brasseur, Jonathan Roger Michel Henri Lenoir, Jérôme Buridant, et al.. Pédoanthracologie : approche méthodologique et statistique. Mieux appréhender l'histoire et l'exploitation anthropique passée des sols forestiers.. *Revue du Nord. Collection Archéologie (Hors série)*, 2015, 23, pp.73-83. hal-04468024

HAL Id: hal-04468024

<https://hal.science/hal-04468024>

Submitted on 20 Feb 2024

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

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

Public Domain

Rencontres Internationales de Liessies

2014

Sols en mouvement

Etudes réunies par
Corinne Beck
Fabrice Guizard
Jacques Heude

REVUE DU NORD

Hors série. Collection Art et Archéologie N° 23. 2015. Université de Lille 3

Pédoanthracologie : approche méthodologique et statistique. Mieux appréhender l'histoire et l'exploitation anthropique passée des sols forestiers.

1. INTRODUCTION

De nombreux travaux se sont appuyés sur une double approche écologique et historique pour étudier l'impact des usages anciens sur la végétation actuelle¹. Les périodes considérées sont séculaires à pluriséculaires et le calage temporel des usages anciens peut être établi à partir d'archives² 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 irréversibles³. Cette persistance est reflétée, par exemple, par des taux de phosphore ou d'azote⁴ 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 sols⁵, les charbons de bois se conservent correctement d'où leur utilisation en archéologie⁶. 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 change-

ments 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'Holocène⁷, soit pour reconstituer l'histoire des feux de forêts⁸, soit encore pour comprendre la dynamique des forêts de montagne⁹ et de plaine¹⁰. 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 biologique¹¹. La distribution horizontale des charbons de bois a plus rarement été considérée. Talon *et al.* (2005) remarquent une forte hétérogénéité spatiale des anthracomasses (sur 2 500 m²) et Touflan *et al.* (2008) décrivent cette hétérogénéité en terme 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

*. — Thomas FEISS, Hélène HOREN, Boris BRASSEUR, Jonathan LENOIR, Jérôme BURIDANT, Guillaume DECOCQ, Université de Picardie Jules Verne, laboratoire EDYSAN, FRE 3498, 1 rue de Louvels, 80037 Amiens Cedex 1, courriel : thomas.feiss@yahoo.fr.

1. — HERMY, VERHEYEN 2007; DUPOUEY 2002.

2. — VALLAURI 2012.

3. — DAMBRINE 2007; DECOCQ 2004; DUPOUEY 2002; PLUE 2008.

4. — GLATZEL 1999.

5. — LOWE 1982.

6. — MARGUERIE, HUNOT 2007.

7. — TALON 1998.

8. — TALON 2005.

9. — TOUFLAN 2010.

10. — ROBIN 2011.

11. — CARCAILLET, TALON 1996; GOEPP 2007.

mécanisme de la distribution verticale et horizontale des charbons et d'estimer l'effort minimal d'échantillonnage 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.

2. DESCRIPTION ET HISTORIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Les massifs de Compiègne et de Saint-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 trois 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. À Saint-Gobain, nous rencontrons du Lutétien supérieur, des sables de Beauchamp et de Cuise et du limon loessiques. L'existence de ces deux forêts est avérée depuis le Moyen Âge¹². Les contextes historiques de développement de ces deux massifs sont très différents. La forêt de Saint-Gobain est une ancienne forêt de production à destination des industries du verre¹³. 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^e et le xi^e s., nous disposons de très peu de données sur l'état et l'évolution de ces bois. En revanche, dès le xii^e s., de nombreuses sources indiquent une forte présence de l'homme en forêt. Puis, à partir du xv^e s., 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*.

3. MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1. Sélection des sites et échantillonnage

L'échantillonnage a été conduit par massif pour trois types de substrats : sol sur roche calcaire, podzol et luvisol¹⁴ 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 prélèvements¹⁵. Nous avons travaillé dans des peuplements forestiers matures. Les placettes, d'une surface de 1 000 m², 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 anthracologique¹⁶, chaque niveau a été prélevé sur les quatre 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 trente prélèvements de 1 l dans un maillage de trente 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.

3.2. 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.

12. — Compiègne : *Dix Livres d'Histoire* par Grégoire de Tours (4^e livre), vi^e s. Saint-Gobain : BURIDANT 1999.

13. — BURIDANT 1999.

14. — AFES, 2008.

15. — CARCAILLET, THINON 1996.

16. — CARCAILLET, THINON 1996.

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).

3.3. Extraction, identification et datation des charbons

Les échantillons pédoanthracologiques ont été séchés à l'air libre pendant 48 heures, pesés puis placés dans un bain d'eau 48 heures de plus, avec adjonction de défloculant ((NaPO₃)₆) 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 trois 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 trente prélèvements à la tarière ont été extraits pour les six sites. Dans les fosses, 20 l par niveau ont été traités pour les sols sur roche calcaire et podzols de Compiègne. Les luvisols de Compiègne et de Saint-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 podzols de Saint-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⁻¹)¹⁷, 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 trois sites de Compiègne à l'aide d'un microscope à lumière réfléchie (Leica® dm 2500). Elle est facilitée par l'utilisation d'atlas anatomiques du bois¹⁸ 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 quinze charbons a été datée par la technique AMS radiocarbène au laboratoire Poznan Radiocarbon Laboratory (Pologne). Le choix des charbons a été fait selon l'essence, le poids et la qua-

lité du fragment. Les dates ont ensuite été calibrées sur la plateforme Oxcal en utilisant la référence IntCal13. Nous avons sélectionné trois 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.

3.4. Analyse des données

Nous avons, tout d'abord, analysé les données d'anthracomasse 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 trente prélèvements à la tarière et des vingt 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 dix 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 trois 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.

17. — CARCAILLET, THINON 1996.

18. — SCHWEINGRUBER 1990a-b.

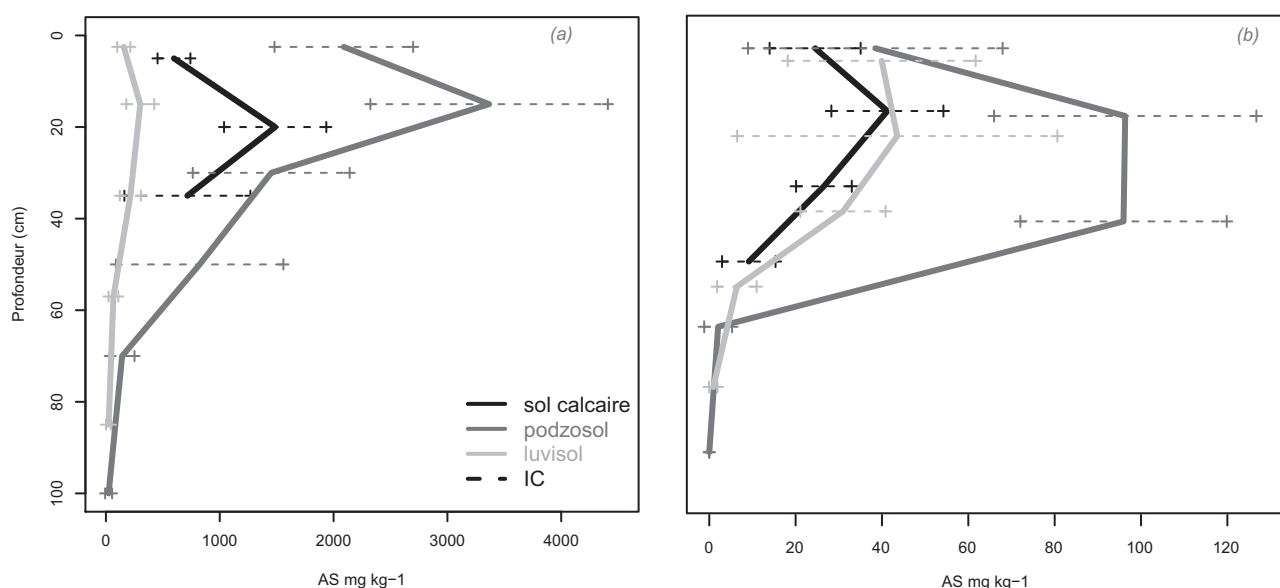


FIG. 1. — Distribution verticale des anthracomasses selon la forêt, le sol et la profondeur. IC = Intervalle de confiance à 95 %. (a) pour Saint-Gobain et (b) pour Compiègne.

4. RÉSULTATS

4.1. Distribution des anthracomasses (AS)

Dans les horizons des six fosses, les quantités de charbons sont significativement supérieures pour Saint-Gobain avec un intervalle allant de 0 à 4499 mg.kg⁻¹ contre 0 à 258 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 (fig. 1). 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 cinq cas sur six (tab. 1). Dans le seul cas du luvisol de Saint-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.

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 Saint-Gobain a une AS de 715 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 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 tarière, la richesse en charbons est encore significativement supérieure pour Saint-Gobain avec un intervalle allant de 0 à 40189 mg.kg⁻¹ contre 0 à 1421 mg.kg⁻¹ pour Compiègne.

4.2. Structure spatiale de l'anthracomasse

L'indice de Moran a été calculé pour les trente prélèvements du maillage horizontal de chaque site. La distance minimale entre les échantillons est de 5 m. À 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 (fig. 2: exemple du luvisol de Saint-Gobain).

Dans les fosses, la distance entre deux échantillons consécutifs d'un même niveau est de 35 cm. La figure 3 présente les corrélogrammes du sol sur calcaire et du podzosol 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 podzosol (fig. 3-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 quatrième niveau (58 cm) montre, sur le corrélogramme, un signal plat (sub-nul), indiquant qu'il n'y a pas de structure spatiale

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

Tableau 1. — Données pédologiques par site et par horizon pour Saint-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.

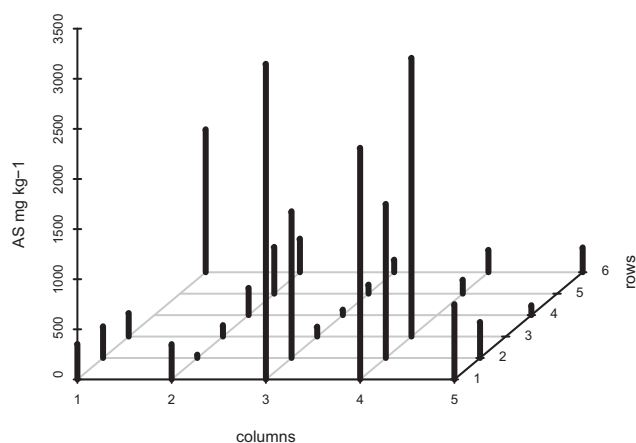


FIG. 2. — Distribution horizontale des anthracomasses pour la profondeur 0-20 cm. Exemple pour le luvisol de la forêt de Saint-Gobain.

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. 3-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.

4.3. 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 (fig. 4-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 : $\alpha = 3,5$, $\beta = 5,5$ et $\gamma = 9,0$. Si l'on représente les hori-

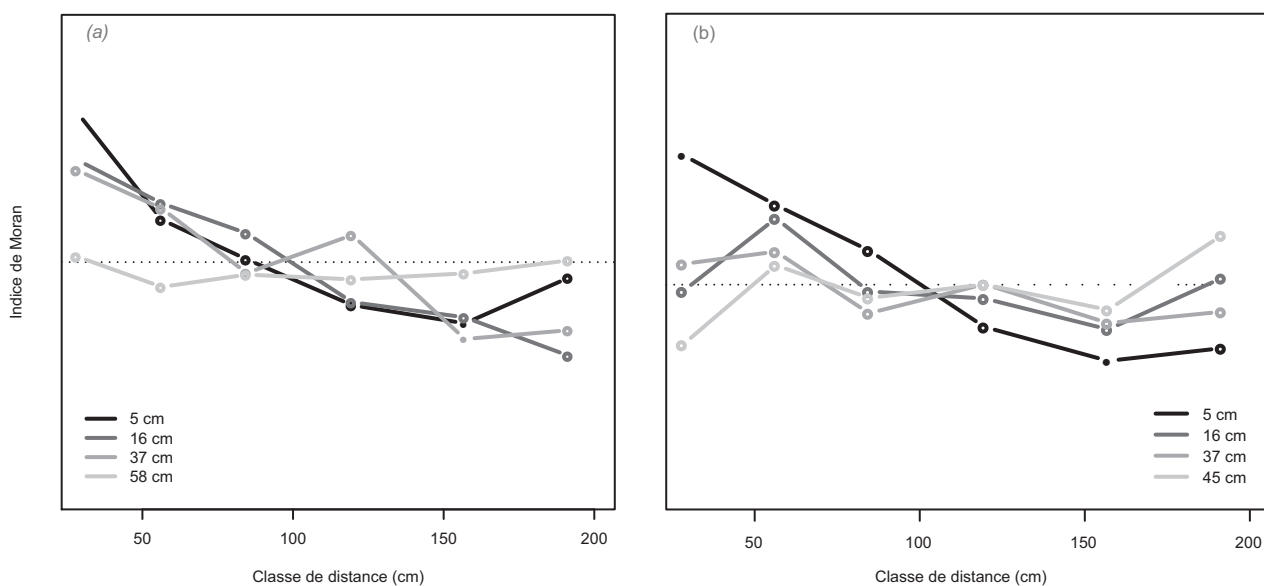


FIG. 3. — Correlogrammes des fosses podzosol (a) et sol calcaire (b) de Compiègne. L'indice I de Moran est calculé pour chaque horizon et à chaque classe de distance (35 cm). (o = non significatif, • = significatif $p < 0,05$).

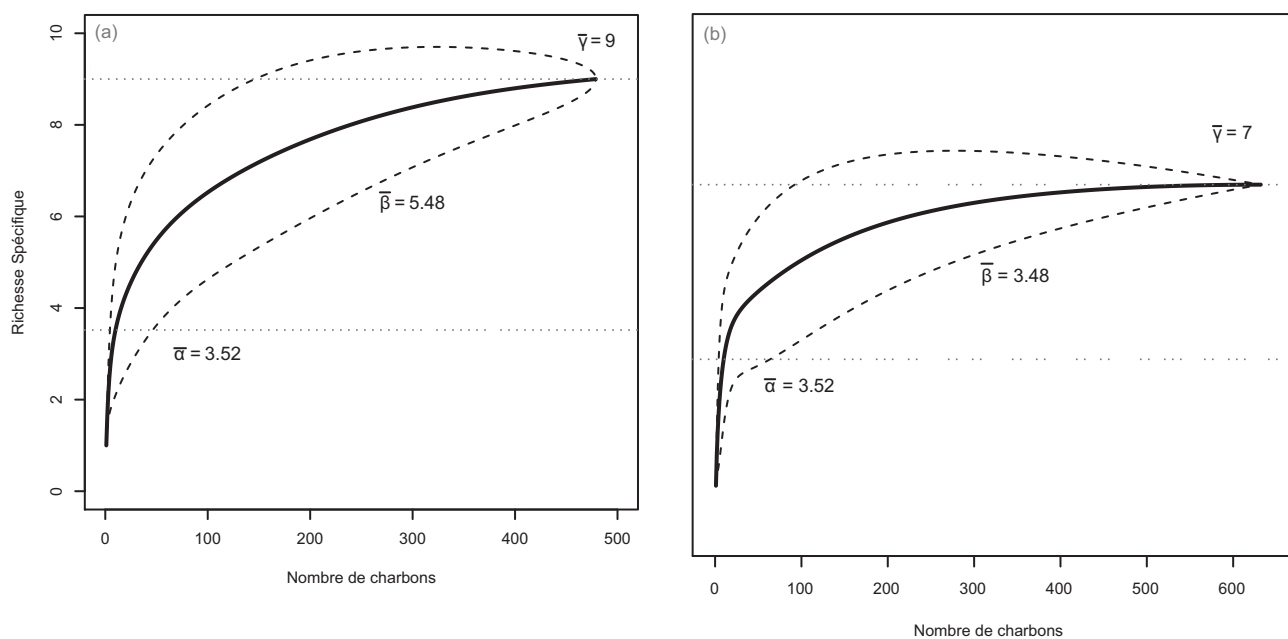


FIG. 4. — Courbes de raréfaction et partition additive de la diversité pour le luvisol de Compiègne. (a) pour la fosse tous niveaux confondus, (b) pour les trente tarières. Autour des courbes figure l'intervalle de confiance à 95 %.

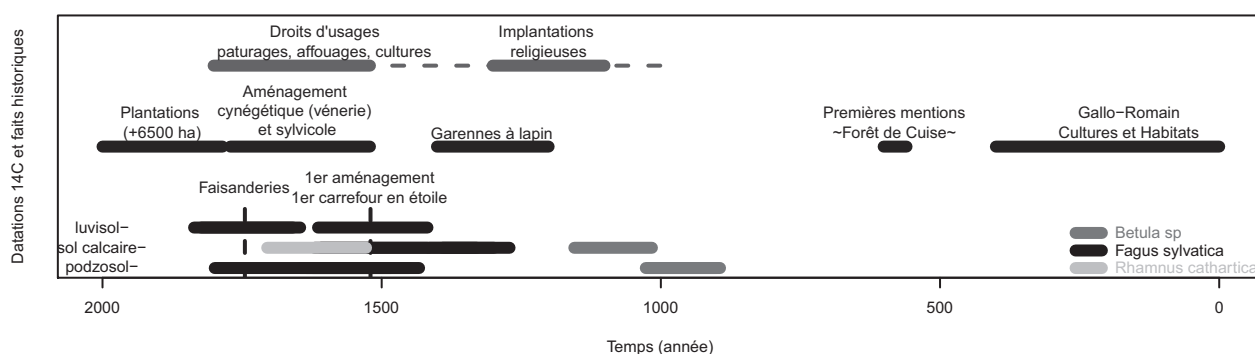


FIG. 5. — Frise chronologique de l'histoire de la forêt de Compiègne depuis le 1^{er} s. de notre ère. Sur la moitié supérieure, les faits historiques. Sur la moitié inférieure, les quinze datations ¹⁴C de charbon provenant des trois sites de la forêt.

zons 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 (fig. 4-b), la courbe présente une asymptote à 570 charbons. La dendroflores carbonisée dans les vingt premiers centimètres du sol est représentative de la diversité locale. Les indices de diversité sont : $\alpha = 3,5$, $\beta = 3,5$ et $\gamma = 7,0$. Si on compare « fosse » versus « tarière », on note que 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.

4.4. Datation ¹⁴C de la forêt de Compiègne

Les dates obtenues couvrent une période de temps assez longue, du IX^e au XIX^e s. (fig. 5). 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 podzol).

Fagus sylvatica, retrouvé dans les trois 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.

5. DISCUSSION

5.1. Les valeurs d'anthracomasses

La forêt de Saint-Gobain a révélé des quantités de charbons très élevées pour des sols forestiers (fig. 1). Seuls quelques auteurs, étudiant les évolutions des forêts alpines, montrent une richesse voisine¹⁹. Pour la forêt de Compiègne, l'anthracomasse est plus proche de ce qui est habituellement décrit dans la littérature pour des massifs forestiers²⁰. L'anthracomasse 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 les lieux où les traces des incendies passés sont les plus visibles.

5.2. La distribution verticale des charbons dans les sols

Pour tous les sites, le niveau de prélèvement pour lequel l'anthracomasse 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 ¹⁴C de nos charbons. Dans les sols, l'absence de stratification des charbons en fonction de leur âge, déjà constatée dans de nombreuses publications²¹, prouve que des spécimens datés dans des horizons

19. — COMPOSTELLA 2012; TOUFLAN 2009.

20. — CARCAILLET 2001; CUNILL 2012; GOEPP 2007; ROBIN 2012; TOUFLAN 2009.

21. — CARCAILLET 1996; GOEPP 2007.

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 faune²²...

5.3. 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'incendie²³. 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 anthracomasses, 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 (2 500 ou 5 000 m²)²⁴.

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 anthracomasses 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.

5.4. 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 pédoanthracologiques²⁵, 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)²⁶. 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 β . 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 niveaux 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 1 000 m². Le principal atout de cette méthode est la rapidité de l'échantillonnage sur une grande sur-

22. — LANGHOR 2000; SCHEU 1987.

23. — PAYETTE 2008; ASSELIN 2005.

24. — TOUFLAN 2009, 2010, TALON 2005; ROBIN 2012.

25. — ALI 2005; BERGAGLIO 2006; DEHLON 2005; DUTOIT 2009.

26. — ROBIN 2013.

face. Cette manière opératoire doit aussi être confrontée à sa représentativité statistique. Avec nos trente relevés de 1 l pour 1 000 m², 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 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'anthracomasse 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 (1 000 m²) que celle des fosses (2,25 m²). En revanche c'est le volume et la densité d'échantillonnage au m² qui influent de manière significative sur la richesse spécifique des relevés anthracologiques.

5.5. Datation ¹⁴C et événements historiques sur Compiègne

Les trois dates les plus anciennes appartiennent au taxon *Betula sp.* Ils correspondent au début de la période de réglementation 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 onze dates de *Fagus sylvatica* sont concentrées sur six siècles. Leurs présences sont corrélées à 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^e s. est à mettre en lien avec l'évolution des politiques et des pratiques forestières et, notamment, la défense des forêts contre les incendies.

6. 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 pédoanthracologiques²⁷, 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'anthracomasse 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 ¹⁴C 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 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 β 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.

27. — TALON 2005 ; TOUFLAN 2008 ; ROBIN 2012.

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 m², 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.

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

Remerciements

Les auteurs remercient Claire Delhon 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.

Bibliographie

ALI, CARCAILLET 2005a-b : 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, PAYETTE 2005 : 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 2006 : 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 1999 : BURIDANT J., *Les espaces Laonnais (début XVII^e-début XIX^e siècle). Hommes, environnements et paysages à l'époque pré-industrielle*, Paris, 1999. (Thèse de doctorat de l'Université de Paris IV-Sorbonne)

CARCAILLET, THINON 1996 : CARCAILLET C., THINON M., « Pédoanthracological 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 2001 : CARCAILLET C., « 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, 2001, p. 21-28.

COMPOSTELLA, TROMBINO 2013 : COMPOSTELLA C., TROMBINO L., « Late Holocene soil evolution and treeline fluctuations in the Northern Apennine », *Quaternary International*, 289, 2013, p. 46-59.

CUNILL, SORIANO 2012 : 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, DUPOUEY 2007 : DAMBRINE E., DUPOUEY J.-L., « Present forest biodiversity patterns in France related to former Roman agriculture », *Ecology*, 88, 2007, p. 1430-1439.

DECOCQ, AUBERT 2004 : 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, THIÉBAULT 2005 : 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.

DUCHAUFOR 2001 : DUCHAUFOR P., *Introduction à la science du sol. Sol, végétation, environnement*, Paris, 2001.

DUPOUEY, DAMBRINE 2002 : DUPOUEY J.-L., DAMBRINE E., « Irreversible impact of past land use on forest soils and biodiversity », *Ecology*, 83, 2002, p. 2978-2984.

DUTOIT, THINON 2009 : 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 2007 : GOEPP S., *Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien. Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme*, Strasbourg, 2007. (Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur-Strasbourg I)

HERMY, VERHEYEN 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, SPIECKER 1998 : 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 », *European Forest Institute, Joensuu, Finland*, 1998.

LANGHOR 2000 : 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 1982 : LOWE J. J., « Three Flandrian pollen profiles from the Teith Valley, Perthshire, Scotland », *New Phytologist*, 90, 1982, p. 371-385.

MARGUERIE, HUNOT 2007 : 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, FILION 2008 : 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, HERMY 2008 : PLUE J., HERMY M., « Persistent changes in forest vegetation and seed bank 1600 years after human

occupation », *Landscape Ecology*, 23, 2008, p. 673-688.

R Core Team 2014 : R Core Team, « R : A language and environment for statistical computing », *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria, 2014.

ROBIN, RICKERT 2011 : 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, TALON 2013a : ROBIN V., TALON B., « Pedoanthracological contribution to forest naturalness assessment », *Quaternary International*, 289, 2013a, p. 78-87.

SCHEU 1987 : SCHEU S., « The role of substrate feeding earthworms (*Lumbricidae*) for bioturbation in a beechwood soil », *Oecologia*, 72, 1987, p. 192-196.

SCHWEINGRUBER 1990a : SCHWEINGRUBER F.H., *Anatomy of European Woods*, Bern, Stuttgart, 1990a.

SCHWEINGRUBER 1990b : SCHWEINGRUBER F.H., *Microscopic Wood Anatomy*, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf, 1990b.

TALON, CARCAILLET 1998 : 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, PAYETTE 2005 : 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 1992 : THINON M., *L'analyse pédoanthracologique. Aspects méthodologiques et applications*, Aix-Marseille, 1992. (Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille)

TOUFLAN, TALON 2008 : 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, TALON 2009 : TOUFLAN P., TALON B., « Spatial Reliability of Soil Charcoal Analysis: The Case of Subalpine Forest Soils », *Ecoscience*, 16, 2009, p. 23-27.

TOUFLAN, TALON 2010 : 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, GREL 2012 : VALLAURI D., GREL A., « Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles », *Rapport WWF/INRA*, Marseille, 64, 2012.

Avant-propos		9
Introduction		11
<i>Un sol, des sols. Regards et discours des hommes sur le sol</i>		
Pour une philosophie du sol. Sur les pas d'Ivan Illich (1926-2002).	<i>Silvia Grünig Iribarren</i>	17
Cartographier et « nettoyer » les sols pollués : représentations et enjeux sociaux.	<i>Marie-Thérèse Neuilly</i>	25
La diversité de perceptions de sols par les gestionnaires.	<i>Camille Guellier, Antonio Bispo, Jurgis Sapijanskas</i>	35
Négocier l'érosion. Les sols uruguayens entre avancée de la frontière agricole et tentatives de régulation des pratiques culturelles.	<i>Gabrielle Marquis-Dupont, Pierre Gautreau, Pedro Arbeletche</i>	37
<i>Le sol, mémoire dynamique</i>		
Des sols holocènes « lessivés » ?		
Quelques « sols en mouvements » des derniers 6000 ans dans Nord de la France et en Moyenne Belgique.	<i>Kai Fechner, Frédéric Broes, avec la coll. de Viviane Clavel</i>	41
Impacts des anciennes activités humaines dans les sols vosgiens actuellement sous couvert forestier.	<i>Anne Gebhardt, Dominique Schwartz, Damien Ertlen, Arnaud Campaner, Nicolas Meyer, Roger Langohr</i>	59
Pédoanthracologie : approche méthodologique et statistique. Mieux appréhender l'histoire et l'exploitation anthropique passée des sols forestiers.	<i>Thomas Feiss, Hélène Horen, Boris Brasseur, Jonathan Lenoir, Jérôme Buridant, Guillaume Decocq</i>	73
Relation entre les structures archéologiques identifiées sur un levé LIDAR et la typologie des sols du massif forestier de Compiègne (Nord de la France).	<i>Hélène Horen, Jérôme Buridant, Émilie Gallet-Moron, Boris Brasseur, Thomas Feiss, Marie Héraude, Sylvain Rassat, Cyril Montoya, Valérie Burban-Col</i>	85
Analyse des sols et restitution des paysages autour des habitats désertés médiévaux du haut Val Suzon (Côte-d'Or).	<i>Corinne Beck, Patrice Beck, Étienne Dambrine, Jean-Luc Dupouey, Frank Faucher, Jean-Louis Maigrot</i>	95
Dynamiques d'évolution des luvisols suivant leurs histoires agricole et forestière.	<i>Boris Brasseur, Hélène Horen, Jérôme Buridant</i>	105
Dégradation morphologique et agriculture : quantification des évolutions pédologiques sous contraintes anthropiques.	<i>David Montagne, Isabelle Cousin, Sophie Cornu</i>	113
Évolution du paysage pédologique en Belgique et dans le nord-ouest de la France. Recherche des sites « patrimoine ».	<i>Roger Langohr</i>	115
<i>Construction des sols urbains</i>		
Regards croisés sur les sols archéologiques de l'impasse des Chartreux à Lyon.	<i>Stéphane Gaillot, Cyrille Ducourthial</i>	119
Apport de la géoarchéologie à l'étude des espaces de circulation dans les villes antiques (Nord de la France).	<i>Marie-Caroline Charbonnier, Cécilia Cammas, avec la coll. de Raphaël Clotuche, Laurent Guyard, Jennifer Clerget, Géraldine Teyssie</i>	133
Le baobab est grand mais sa graine est petite. Chroniques environnementales de quelques sols burkinabè.	<i>Bertrand Sajaloli, Mikaël Motelica</i>	147
Archéologie du sol d'occupation : discontinuités, temporalités et fonctions.	<i>Mélanie Fondrillon, Emmanuel Marot</i>	149
Nouveaux horizons.	<i>Fabrice Guizard</i>	151
Résumés (français, anglais).		157

ISSN : 1295-1315

ISBN : 979-10-93095-04-2

Prix : 45 €