

Transformation pédologique des produits de combustion: approche expérimentale

Marie-Agnès Courty⁽¹⁾⁽²⁾

1) CNRS-MNHN UMR 7194, 1 rue René Panhard, 75013 Paris, France.

2) IPHES, Institut Català de Paleoecologia Humana i Evolució Social. C/ESCORXADOR, s/n. 43003 Tarragona. Espagne

Mail: court@mnhn.fr

RÉSUMÉ

L'interprétation des situations d'incendies naturels et de feux anthropiques dans les archives continentales est fortement tributaire des conditions de fossilisation des produits de pyrolyse des combustibles végétaux. Peu de travaux se sont intéressés à l'évolution des faciès de combustion lors de la régénération du couvert pédologique et à l'incidence de la pédogenèse sur une possible préservation sélective des produits pyrolytiques. L'étude présentée ici se propose d'approfondir l'influence des processus pédologiques sur la fossilisation des résidus carbonisés à partir de données contrôlées. Le corpus de données est issu de grands feux de nettoyages réalisés dans la forêt du domaine de Grignon (Ile-de-France). La transformation de cinq accumulations de charbons et de cendres de bois et des sols associés, sélectionnés dans des conditions stationnelles variées, a fait l'objet d'un suivi régulier pendant trois ans. Les observations de terrain ont été complétées par des analyses micromorphologiques, minéralogiques et géochimiques. Le suivi a permis de dégager cinq états de transformation: (1) la formation d'un faciès microstratifié constitué des dépôts cendro-charbonneux et de l'horizon humique sous-jacent altéré par la combustion; (2) après 6 mois d'exposition, une compaction du faciès de combustion microstratifié et la colonisation par un couvert de mousse et de lichen endolithique, initiateur de la dégradation microbienne et de la décomposition chimique; (3) après un an, la régénération progressive du couvert végétal accompagnée d'une homogénéisation accélérée des dépôts cendro-charbonneux par des lombrics beaucoup plus abondants que dans le sol adjacent; (4) au terme de deux ans, la régénération d'une strate herbacée, la disparition de la zone de combustion, la dissolution complète des cendres et l'intégration totale des charbons par les lombrics à la masse fine du sol; (5) au terme de la troisième année, la régénération du sous-bois et le retour du sol à l'état initial avec disparition totale des marqueurs de combustion. Ce suivi réalisé dans des conditions pédologiques représentatives des contextes interglaciaires de l'Europe de l'Ouest souligne la rapidité de l'altération des signatures de combustion au cours des premiers stades de fossilisation. Ces résultats suggèrent que les produits de combustion fortement réfractaires fréquemment rencontrés dans les signaux incendie actuels et passés expriment des situations de pyrolyse particulières, jusqu'à ce jour peu documentées.

Mots clés

Pyrolyse, charbons, cendres, agrégat, bioturbation, faciès de combustion.

SUMMARY**IMPACTS OF LAND-USE CHANGES ON SOIL ORGANIC MATTER, MICROBIAL COMMUNITIES AND C AND N FLUXES**

The interpretation of wild-fire situations and anthropic firing in continental archives is strongly constrained by fossilization conditions of pyrolytic products from biomass combustible. The evolution of combustion facies during the regeneration of the soil cover and the effects of pedogenesis on a possible selective preservation of pyrolytic products have not been thoroughly investigated. The study presented here intends to further elucidate the role of pedological processes on the fossilization of carbonaceous residues based on controlled conditions. The data are provided by a series of severe fires that have been performed in the state forest of Grignon (Ile-de-France) for cleaning purposes. The transformation of five accumulations formed of charcoal and wood ashes together with the host soils, selected in diverse local settings, has been followed at regular time intervals for three years. The field observations have been completed by micromorphological, mineralogical and geochemical analyses. The time control has allowed to recognizing three stages of transformation: (1) the formation of a micro-stratified facies formed of ashy-charred deposits and of the burnt underlying humic horizon (Fig. 1); (2) six months after, a compaction of the microstratified combustion facies and the colonisation by endolithic lichen and mosses (Fig. 2a); (3) one year after, the progressive regeneration of the vegetation cover together with an increased homogenisation of the ashy-charred deposits by earthworms to the soil fine mass; (4) two years after, the regeneration of a grass cover, the disappearance of the combustion zone, the complete dissolution of the ashes and the total integration of the charcoal by earthworms to the soil fine mass (Fig. 2b,c,d, e); (5) at the end of the third year, the regeneration of the forest cover and the return to the initial soil aspect with the total disappearance of the combustion markers. The pedological conditions of this survey are representative of interglacial contexts of Western Europe. The results emphasize how rapidly combustion signatures disappear during the first stages of fossilization. As a consequence, the highly resistant combustion products that are commonly encountered in past and present firing soil records are suggested to derive from singular pyrolysis situations, yet to be further documented.

Key-words

Pyrolysis, charcoal, ash, aggregate, bioturbation, combustion facies.

RESUMEN**TRANSFORMACIONES PEDOLÓGICAS DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN: estudio experimental**

La interpretación de las situaciones de incendios naturales y fuegos antrópicos en los archivos continentales está muy tributaria de las condiciones de fosilización de los productos de pirólisis de los combustibles vegetales. Pocos trabajos se interesaron a la evolución de las facies de combustión en la regeneración de la cubierta pedológica y a la incidencia de la edafogénesis sobre una posible conservación selectiva de los productos piróliticos. El estudio presentado aquí se propone profundizar la influencia de los procesos pedológicos sobre la fosilización de los residuos carbonizados a partir de datos controlados. El corpus de datos está resultante de grandes fuegos de limpiezas realizados en el bosque de la propiedad de Grignon (Isla-de-Francia). La transformación de cinco acumulaciones de carbones y cenizas de madera y de suelos asociados, seleccionados en condiciones edáficas variadas, fue objeto de un seguimiento regular durante tres años. Las observaciones de terreno fueron completadas por análisis micromorfológicos, mineralógicos y geoquímicos. El seguimiento permitió identificar cinco estados de transformación: (1) la formación de una facies microestratificada constituida de los depósitos carbonosos-cendro y del horizonte húmico subyacente alterado por la combustión; (2) después de 6 meses de exposición, un apisonamiento de la facies de combustión microestratificada y de la colonización por una cubierta de musgo y líquen endolítico, iniciador de la degradación microbiana y la descomposición química; (3) después de un año, la regeneración progresiva de la cubierta vegetal acompañada de una homogeneización acelerada de los depósitos carbonosos-cendro por lombrices, mucho más abundantes que en el suelo adyacente; (4) al término de dos años, la regeneración de una capa herbácea, la desaparición de la zona de combustión, la disolución completa de las cenizas y la integración total de los carbones por las lombrices a la masa fina del suelo; (5) al término del tercer año, la regeneración de la cubierta forestal y la vuelta del suelo al estado inicial con desaparición total de los marcadores de combustión. Este seguimiento realizado en condiciones pedológicas representativas de los contextos interglaciales de la Europa del Oeste destaca la rapidez de la alteración de las firmas de combustión durante las primeras fases de fosilización. Estos resultados sugieren que los productos de combustión muy refractarios frecuentemente encontrados en los registros de incendios actuales y pasados expresen situaciones de pirólisis particulares, hasta la fecha poco documentadas.

Palabras clave

Pirólisis, carbones, cenizas, agregado, bioturbación, combustión, facies

Remarque préliminaire

Cet article s'inscrit à l'origine des recherches que j'ai présentées dans la communication donnée lors de la Journée « Hommage à Jean Boulaïne » tenue à Dijon le 4 novembre 2010. Le scepticisme du monde académique face aux hypothèses controversées dont j'ai résumé les points essentiels impose une rigueur irréprochable tant dans la collecte des données que dans la construction des interprétations, et ce avant toute publication synthétique. Alors que cette démarche suit son cours, j'ai préféré présenter dans cet hommage une étude que j'avais réalisée dès mon arrivée à l'INA P-G à Grignon, sans bien même en comprendre le sens. Après plus de vingt ans de recherches sur les traces laissées dans les sols par des événements exceptionnels, il m'est apparu évident que ce long tâtonnement aurait pu être éclairé par une meilleure connaissance des traces laissées dans les sols par les événements du quotidien. L'étude de l'incidence des feux de nettoyage des forêts sur les sols prend maintenant toute son importance. Si les charbons produits par ces incendies d'entretien disparaissent en quelques mois, alors qu'en est-il de ces charbons qui ont résisté pendant des millénaires aux processus pédologiques ? Il s'agit bien ici d'illustrer comment une approche naturaliste profondément ancrée dans une démarche empirique peut apporter sa modeste contribution quant à la connaissance du cycle du carbone.

Les effets des feux de forêt sur la transformation des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol ont fait l'objet de travaux considérables afin de maîtriser l'influence des situations d'incendie sur la disponibilité à long terme des réserves azotées et carbonées et sur l'érodibilité des sols (De la Rosa *et al.*, 2008; Hilsher *et al.*, 2009; Knicker, 2011). Les suivis de situations contrôlées et de parcelles expérimentales ont bien montré la persistance pendant au moins six mois après l'incendie du caractère hydrofuge des horizons de surface, conséquence de la vaporisation de substances organiques (DeBano *et al.*, 1998). La ré-humectation du sol est significativement accélérée dans les zones de concentration de consommation de fuel marquées par un épais dépôt cendreux (Doerr *et al.*, 2003; Doerr *et al.*, 2006; Cerda et Doerr, 2008). La diminution rapide des températures à quelques centimètres sous la surface du sol limite les transformations des minéraux argileux et la production d'agrégats fortement résistants à l'érosion (Campo *et al.*, 2008). L'incorporation au sol des produits condensés thermiquement est connue pour former un stock de matières organiques passives constitué de deux composantes dans des proportions variables selon les degrés de combustion : matière organique réfractaire presque inaltérable, dénommée le « black carbon » (BC), et une forme ubiquiste de matière organique réfractaire (OMR), à laquelle appartiennent les chars et les résidus carbonisés qui sont considérés comme se dégradant plus ou moins lentement selon les conditions de milieu (Schneour 1966, Hockaday *et al.*, 2006; De la Rosa *et al.*, 2008; Knicker, 2011). Pour certains auteurs, la résistance élevée à la biodégradation de ces deux types de composés pyrolytiques leur confère un rôle majeur comme marqueurs principaux du signal incendie dans les archives sédimentaires (Skjemstad *et al.*, 1996; Goldberg, 1985; Sponholz *et al.*, 1993). D'autres études ont constaté que l'activité bactérienne peut entraîner une dégradation rapide des charbons de bois par oxydation, en particulier dans des réactions alcalines, jusqu'à une disparition complète (Knicker, 2011). Par contre, dans des

conditions de mauvais drainage ou de permafrost, la récalcitrance beaucoup plus élevée des composés organiques pyrogènes permettrait des temps de résidence dans les sols de plusieurs milliers d'années (Knicker, 2011).

La plupart des études portant sur le paléo-signal incendie considèrent que les produits pyrolytiques résistent bien à l'altération dans les sols et sont plus ou moins rapidement exportés après les grands incendies par l'érosion hydrique vers les milieux d'atterrissement – tourbes, dépression, lacs, contextes marins (Teixeira *et al.*, 2002). En conséquence, la quantification de charbons et de micro-charbons constitue l'une des proxies les plus largement utilisées pour aborder les questions touchant à la fréquence des incendies dans le passé, leur dimension locale ou régionale et leurs mécanismes de déclenchement (Filion 1984; Carcaillet *et al.*, 2002; Beaufort *et al.*, 2003; Daniau *et al.*, 2009). La datation radiocarbone par AMS/SMA (spectrométrie de masse par accélérateur) a cependant conduit à avancer l'hypothèse que les concentrations de charbons dans les sols holocènes sont spécifiques d'incendies sévères d'origine naturelle, caractérisés par la combustion d'une quantité importante de biomasse (Talon *et al.*, 2005). En l'absence de marqueurs spécifiques des mécanismes d'initiation de la combustion, les approches quantitatives du signal incendie soulignent la difficulté d'établir une différence claire entre les régimes d'incendies d'origine naturelle et ceux d'origine anthropique (Turner *et al.*, 2008). Cette situation aboutit souvent à des interprétations contradictoires d'enregistrements semblables. L'attribution à des anciennes activités humaines de concentrations de résidus carbonisés dans des archives sédimentaires quaternaires procède le plus souvent d'une simple extrapolation, indépendamment d'un contrôle rigoureux de situations d'incendie : « Le feu est un mécanisme par lequel un petit nombre de gens peut avoir de grands impacts sur de larges zones (Pinter *et al.*, 2011) ». Des études approfondies du signal incendie pendant le dernier cycle glaciaire à partir d'archives sédimentaires ont cependant bien montré la corrélation étroite

entre les pics de charbons et les réchauffements des cycles de Dansgaard Oeschger, et ce, indépendamment de toute action anthropique (Mooney *et al.*, 2011; Power *et al.*, 2008; Daniau *et al.*, 2010).

Ces interprétations contradictoires du signal incendie dans les archives sédimentaires soulignent la faiblesse des connaissances quant à la signification des produits de combustion préservés, en termes de nature des combustibles, de processus de pyrolyse et de conditions de fossilisation.

L'étude présentée ici a pour objectif de déterminer les effets de la transformation pédologique des produits de combustion sur la formation du signal incendie dans les stades de pré-fossilisation, pour des situations de combustion courantes. Le corpus de données utilisées provient de grands feux de nettoyages réalisés dans la forêt du domaine de Grignon (Ile-de-France). Le type de combustion peut indifféremment s'appliquer à des situations anthropiques actuelles ou passées impliquant un contrôle strict des apports en combustibles et des cinétiques de combustion, ou à des situations d'incendies naturels sévères entraînant une destruction quasi-totale du couvert forestier.

LA ZONE D'ÉTUDE, SUIVI DES SITUATIONS DE COMBUSTION ET PROTOCOLE ANALYTIQUE

La forêt du domaine de Grignon située dans l'ouest de la région Ile-de-France évolue sous l'influence d'un régime climatique atlantique. Le domaine forestier a été maintenu depuis plusieurs centaines d'années, hors de toute mise en valeur agricole. Les parties les mieux préservées sont situées sur le flanc d'interfluves, sur des placages loessiques mis en place au cours du dernier cycle glaciaire qui recouvrent le calcaire lutétien. Sur les points hauts, le couvert pédologique est constitué de néo-luvisols développés sur la couverture loessique, qui évoluent vers des calcosols et des rendosols sur les pentes et les zones d'atterrissement en fonction de la géométrie des affleurements des calcaires lutétiens sous-jacents. Le domaine forestier a fait l'objet d'un nettoyage de grande ampleur en plusieurs points suite à l'attaque fatale de la totalité des ormes par des parasites. Les arbres morts ont été regroupés en aires d'accumulation espacées de quelques centaines de mètres, en général dans les espaces vides et plan dégagés après abattage des ormes morts. Chaque accumulation se présentait à l'état initial comme une masse de bois mort de plusieurs mètres de haut, entourée de sols partiellement dénudés. Les accumulations ont été mises à feu simultanément et soigneusement contrôlées pendant au moins deux jours, jusqu'à combustion quasi-totale de l'accumulation. Le contrôle a restreint la combustion sur la zone d'accumulation, sans possibilité de s'étendre latéralement.

Le corpus de données présentées ici a été obtenu lors des feux d'entretien du printemps 1982. Il concerne essentiellement

les caractères des horizons de surface des zones de combustion aux étapes suivantes :

- à t zéro (t0) avant la mise à feu;
- à t1 après la combustion;
- à t2 après 6 mois
- de t3 à t6, état d'évolution tous les 6 mois sur trois ans.

Cinq aires de combustion ont été suivies en différents points du parc : position haute, pente et zone d'atterrissement. Pour chaque étape d'observation, une description de terrain a été réalisée sans perturbation de la zone de combustion. Des prélèvements non perturbés et en vrac ont été réalisés au cœur de la zone de combustion, en périphérie, et dans la zone intacte non affectée par la combustion. Les échantillons en vrac ont fait l'objet d'une séparation granulométrique par tamisage progressif sous l'eau afin d'évaluer l'état d'agrégation et d'extraire les particules élémentaires sous la loupe binoculaire. La fraction argileuse < 2 µm a été recueillie par décantation pour analyse minéralogique par diffractométrie aux rayons X. Des lames minces ont été réalisées à partir des prélèvements non perturbés après imprégnation par des résines synthétiques. Les résultats présentés ci-dessous intègrent le suivi des observations réalisées au cours de la période d'étude.

RÉSULTATS

La pyrolyse contrôlée des combustibles accumulés a abouti au terme de deux jours de combustion à la formation d'un doublet microstratifié constitué de deux termes de haut en bas (*figure 1a*) : (I) Le faciès cendro-charbonneux (Fcch) produit de la pyrolyse des combustibles; (II) un complexe de faciès infra-centimétriques, expression des altérations thermiques de l'horizon humique d'origine (FHuPy). Le maintien contrôlé de la combustion pendant les deux jours de fonctionnement s'est traduit localement par une perturbation du contact entre Fcch et FHuPy, les combustibles étalés à la périphérie des zones de combustion étant mécaniquement rabattus dans la zone centrale pour réactiver la combustion. Cette perturbation est clairement enregistrée aux échelles microscopiques par l'irrégularité du contact entre les faciès Fcch et FHuPy, soit brutal dans les îlots faiblement perturbés, soit progressif, voire homogénéisés dans les zones ayant fait l'objet d'un rabattage des combustibles vers la zone centrale. En dépit de ces perturbations locales, les cinq zones de combustion montrent une séquence microstratifiée semblable (*figure 1b*) qui présente les caractères types des dépôts d'un foyer haute température, monophasé et bien entretenu (Courty *et al.*, 1989). La description de chaque faciès présentée ci-dessous dresse l'inventaire des principaux caractères diagnostiques qui vont être suivis au cours du vieillissement pédologique.

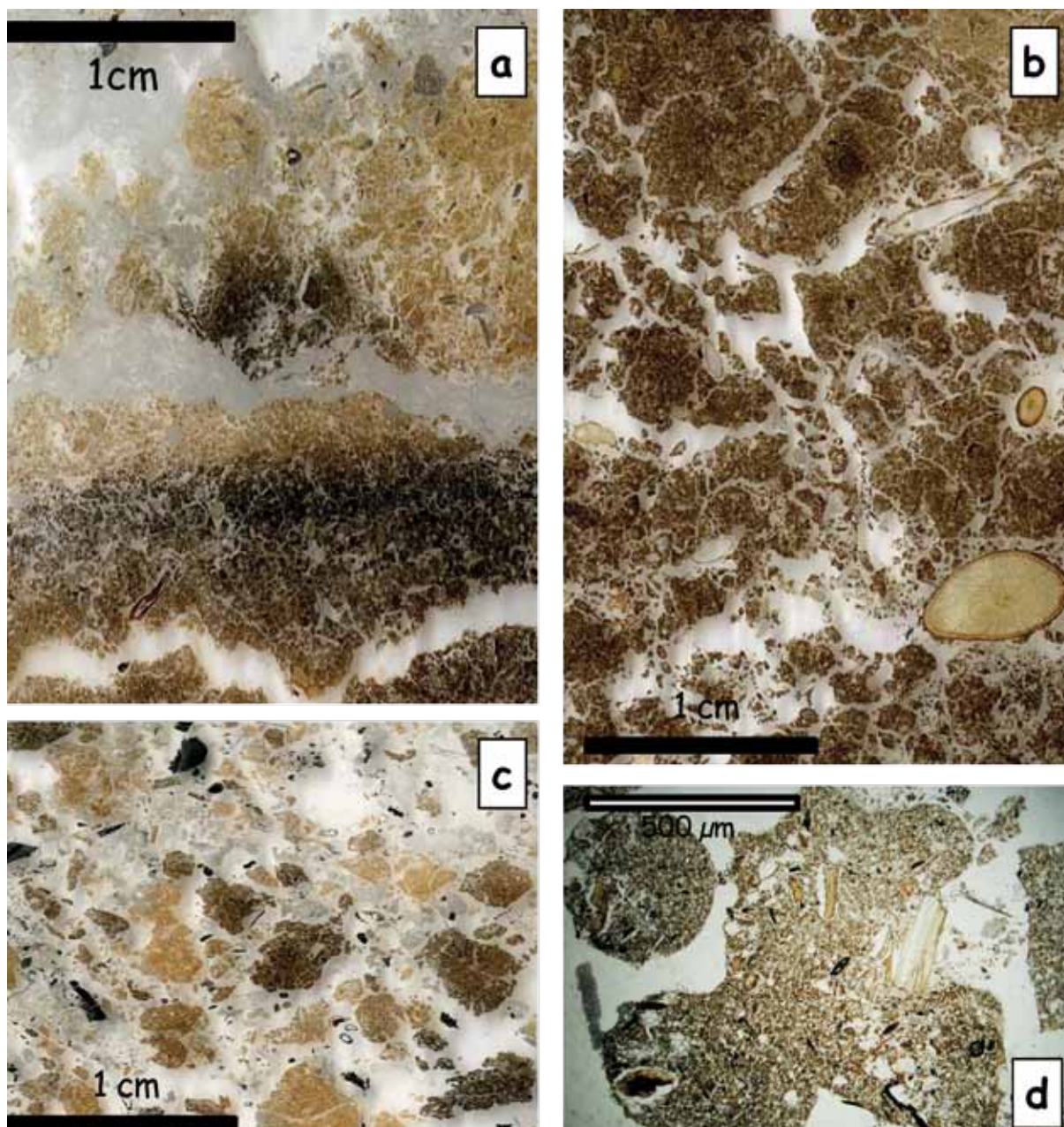


Figure 1 - Vue en lame mince de l'état initial du dépôt de combustion et du sol sous-jacent.

1a : Vue d'ensemble du faciès microstratifié montrant de haut en bas le faciès cendro-charbonneux blanc grisâtre, le faciès rubéfié, le faciès noir carbonisé et le faciès brun jaune de transition à l'horizon B quasi intact.

1b : Vue d'ensemble de l'horizon B quasi intact à 10 cm sous l'interface avec le dépôt de combustion.

1c : Vue du faciès cendro-charbonneux au cœur de l'accumulation la plus épaisse (10 cm) montrant la microstructure granulaire ouverte et l'entassement libre d'agrégats de sols brûlés, de résidus carbonisés et de cendres de bois calcitiques.

1d : Vue des déjections de lombrics accumulées à la partie supérieure du dépôt cendro-charbonneux 6 mois après la combustion, montrant le mélange de résidus carbonisés et de fragments végétaux faiblement humifiés au sein d'une masse basale argilo-calcaire riche en limons calcitiques cendreux.

Figure 1 - View in thin section of the initial combustion facies and of the underlying soil.

1a: General view of the microstratified facies showing from the top to the bottom, the ashy-charred facies, the rubefied facies, the dark charred facies and the yellowish brown facies at the transition with the nearly intact B horizon.

1b: General view of the nearly intact B horizon at 10 cm depth below the combustion accumulation.

1c: View of the ashy-charred facies at its maximum thickness (10 cm) showing the open granular microstructure and the free packing of burnt aggregates, charred residues and calcitic wood ashes.

1d: View of the earthworm faecal pellets accumulated at the top of the ashy-charred facies 6 months after the combustion, showing the mixing of charred residues and weakly humified plant residues within a calcareous clay-rich ground mass with abundant ashy calcitic silt.

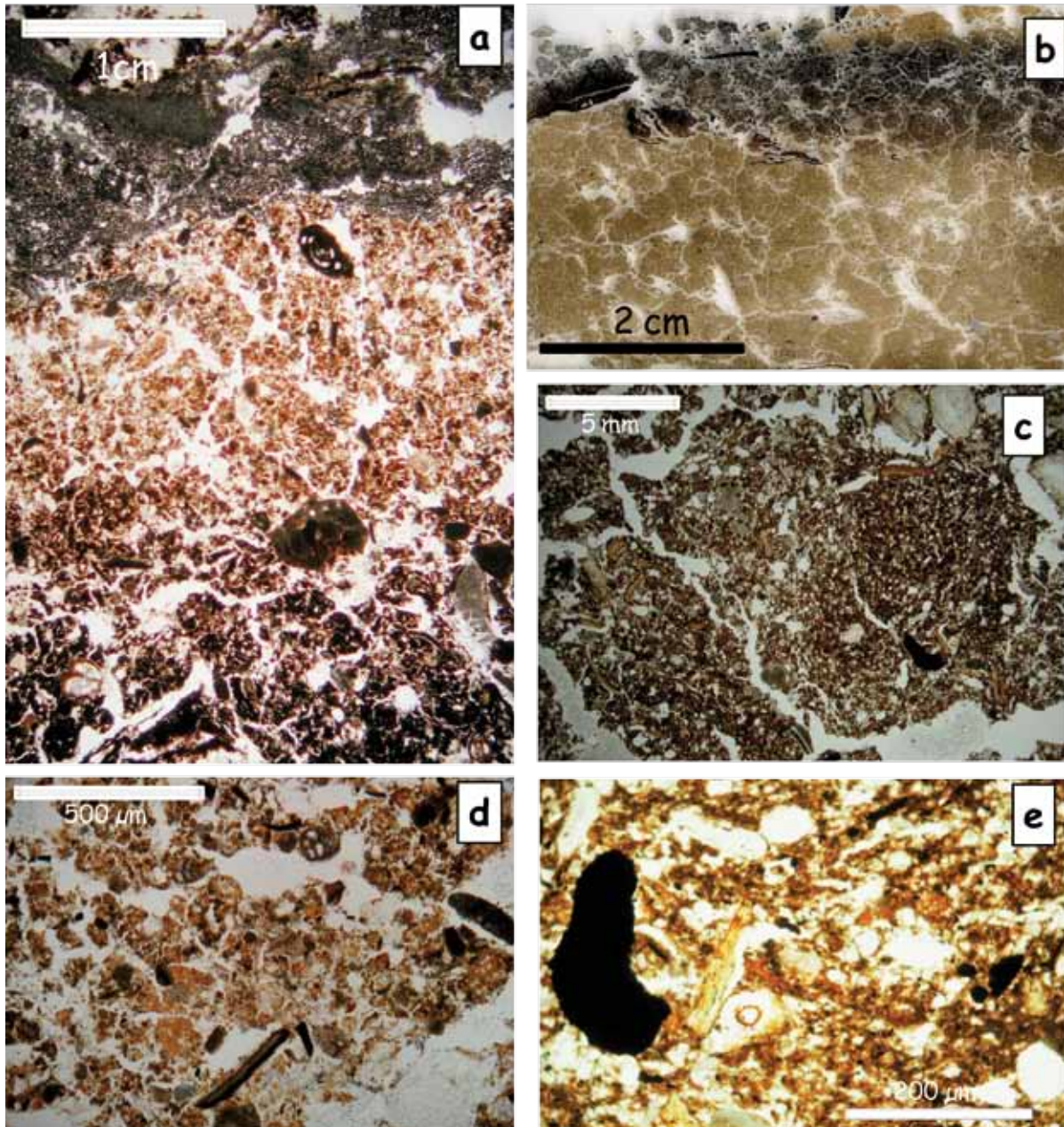


Figure 2 - Vues en lame mince des étapes de dégradation du dépôt de combustion.

2a: Vue d'ensemble du faciès microstratifié 6 mois après la combustion (t2) montrant la compaction et la brunification du faciès cendro-charbonneux.

2b: Vue d'ensemble du faciès microstratifié 1an après la combustion montrant la formation d'un faciès charbonneux brun noir micro-agrégée par suite de la dissolution des cendres calcitiques et de la bioturbation.

2c: Vue détaillée à t3 du faciès charbonneux brun noir micro-agrégé montrant l'assemblage excrémental dense, l'abondance de résidus végétaux faiblement humifiés et la rareté des résidus carbonisés.

2d: Masse fine d'un micro-agrégat de 2b montrant localement l'abondance des sables bioclastiques brun grisâtre altérés par la combustion.

2e: Détail de la masse fine de 2c montrant la disparition totale des cendres calcitiques et un résidu pyrolytique sans structure végétale reconnaissable.

Figure 2 - View in thin section of the degradation stages of the combustion accumulation.

2a: General view of the microstratified facies 6 months after the combustion (t2) showing the compaction and the darkening of the ashy-charred facies.

2b: General view of the microstratified facies one year after the combustion showing the formation of a micro-aggregated dark brown facies due to dissolution of the calcitic ashes and of bioturbation.

2c: General view at t3 of the micro-aggregated dark brown facies showing the dense excremental fabric, the abundance of weakly humified plant residues and the rare charred residues.

2d: Enlarged view of 2c showing the abundance of the fired-cracked grey brown bioclastic sands.

2e: Enlarged view of 2c showing the total disappearance of the calcitic ashes and a pyrolytic residue without anatomical structure.

Le faciès cendro-charbonneux (Fcch)

Il forme un niveau blanc grisâtre de 5 à 15 cm d'épaisseur caractérisé par une microstructure granulaire ouverte et l'entassement libre d'agrégats centimétriques à demi-centimétriques noirs, brun noir, brun orangé et bruns, associés à d'abondants résidus carbonisés, au sein d'une matrice cendreuse pulvérolente (*figure 1b et 1c*); le mélange d'agrégats présentant des altérations thermiques différentes, la juxtaposition de cendres haute température, presque transformées en chaux, et de charbons pluricentimétriques et la structure granulaire sont la conséquence du rabattage des combustibles au cours de la pyrolyse; les abondants fragments de bioclastes provenant du calcaire lutétien sont fortement brunifiés, partiellement amorphisés et finement craquelés par l'altération thermique.

Le complexe de faciès infra-centimétriques de l'horizon humique sus-jacent (FHuPy)

Il comprend de haut en bas : (i) un faciès rubéfié de contact sous la forme d'un niveau centimétrique à pluri-millimétrique brun orangé discontinu devenant plus épais à la périphérie de la zone de combustion, là où le faciès cendreux est absent (*figure 1a*); il est constitué de l'entassement libre ouvert d'agrégats infra-millimétriques subarrondis, finement fissurés, montrant une masse fine fortement rubéfiée et des constituants calcaires brunifiés, finement craquelés; (ii) un faciès noir carbonisé présent sur l'ensemble de la zone de combustion sous la forme d'un niveau demi-centimétrique marqué par l'entassement dense d'agrégats demi-centimétriques subangulaires, brun noir avec des constituants calcaires moyennement brunifiés, irrégulièrement craquelés, et une masse fine riche en résidus carbonisés; (iii) un faciès brun jaune constitué de l'entassement dense d'agrégats centimétriques subanguleux à subarrondis, avec des constituants calcaires légèrement brunifiés et avec une masse fine riche quasiment dépourvue de résidus carbonisés; ce faciès passe graduellement en profondeur à l'horizon B quasi intact comparativement à l'état initial, exception faite d'une teinte un peu plus sombre dans les premiers centimètres liée à l'abondance de fragments de racines carbonisées (*figure 1c*).

La principale différence entre les cinq zones de combustion réside dans l'épaisseur du faciès cendro-charbonneux supérieur et corrélativement du faciès rubéfié de contact. Les zones de combustion de taille plus réduite au départ et ayant fait l'objet d'un contrôle moins attentif montrent un faciès cendro-charbonneux plus compact, moins chargé en agrégats, et un faciès rubéfié surtout marqué en périphérie. Les analyses minéralogiques par diffraction aux rayons X n'ont pas permis de détecter la transformation de goéthite en hématite dans le faciès rubéfié de contact. Dans l'ensemble des faciès sous-jacents au faciès cendro-charbonneux, aucune altération

significative des minéraux argileux n'a été identifiée comparativement à l'état de départ. Ce constat est cohérent avec les observations micromorphologiques qui montrent une amorphisation modérée de la masse fine du faciès rubéfié et du faciès brun noirâtre sans jamais atteindre l'amorphisation totale d'un matériau porté à haute température.

L'évolution pendant les 6 premiers mois (t2) est d'abord marquée par l'accumulation éparse de déjections de lombrics en surface du faciès cendro-charbonneux (Fcch). La juxtaposition dans ces bio-agrégats de différents composés présentant les stigmates d'altération thermique marquée (bioclastes chauffés, cendres, résidus carbonisés) et de fragments végétaux faiblement humifiés atteste d'un mélange de composés provenant des différentes unités du doublet micro-stratifié (*figure 1d*). Au terme des 6 premiers mois, les effets du brassage vertical par les lombrics sont marqués par une compaction (*figure 2a et 2b*) du faciès cendro-charbonneux (Fcch) et corrélativement par le développement d'une pseudo-microlamination. Cette dernière est exprimée par l'alternance de lamines infra-millimétriques discontinues grisâtres, qui correspondent à des cendre légèrement micritisées, et de lamines centimétriques blanc-grisâtre constituées de cendres quasi intactes. La brunification et la densification de l'assemblage calcitique suggère une altération d'origine biologique, vraisemblablement corrélée au développement d'un film brunâtre en surface du faciès cendro-charbonneux.

L'augmentation de l'humidité au cours des 6 mois suivants (t3: hiver-début printemps) permet le développement d'un épais tapis de bryophytes sur les zones de combustion, alors qu'à la périphérie le faciès rubéfié affleurant n'est que partiellement colonisé par les mousses. Sous le tapis de bryophytes, la microstratification initiale apparaît parfaitement préservée, voire même plus lisible du fait de la compaction d'ensemble. Corrélativement, seul le faciès cendro-charbonneux montre une évolution notable marquée par une brunification des assemblages calcitiques, caractéristique d'une dissolution modérée conséquence du maintien de l'humidité, sans percolation de solutions (*figure 2c*).

A la fin du printemps (t4), les premiers végétaux supérieurs se développent sur le tapis de bryophytes en même temps que les lombrics commencent à coloniser la périphérie des zones de combustion, pour rapidement gagner l'ensemble.

Au cours du terme suivant (t5), les végétaux supérieurs couvrent l'ensemble de la zone de combustion et des quantités importantes de turricules de lombrics recouvrent la surface des zones de combustion. La microstratification initiale a quasiment disparu au profit d'un nouvel horizon humique micro-agrégé, encore hétérogène du fait de la juxtaposition de domaines microagrégés de tailles, de teintes et de cohésions variées (*figure 2c*). Il apparaît constitué de l'entassement dense de turricules de lombrics montrant l'imbrication de fragments provenant des différents faciès de combustion (*figure*

2d), Les domaines gris à gris brunâtres présentent les caractères relictuels des cendres calcitiques fortement altérées par la dissolution (Courty *et al.*, 1989). Les sables bioclastiques et fragments de calcaires lutétiens altérés par la chauffe sont reconnaissables à l'état de fragments incorporés aux turricules (figure 2d). Pour l'ensemble des domaines, la masse fine argilo-carbonatée montre localement de rares résidus carbonisés (figure 2e). Aucune modification significative des caractères l'horizon B sous-jacent n'est décelable au microscope pétrographique.

A la fin du dernier terme d'observation, les structures de combustion totalement recouvertes par la végétation ne sont plus identifiables au sol et la microstratification acquise lors de la combustion a totalement disparu. Le brassage par les lombrics a quasi totalement effacé le contact net entre les zones de combustion initiale et les sols intacts adjacents. L'action combinée de la dissolution des carbonates et du brassage biologique a entraîné la disparition totale des dépôts cendreux, y compris des résidus carbonisés, et le retour à l'horizonation d'origine. La masse fine argilo-carbonatée montre une large dominance de fragments végétaux frais à légèrement humifiés, et de rares concentrations de charbons de bois finement fragmentés.

DISCUSSION

En accord avec les études conduites en laboratoire (Knicker *et al.*, 2008), les données fournies par les feux de nettoyage du domaine de Grignon confortent une dégradation rapide des composés pyrogènes issus d'une biomasse représentative de situations d'incendies récurrentes sous les conditions actuelles. L'investissement important mis dans un entretien méticuleux des zones de combustion pour aboutir à une calcination quasi totale de grandes quantités de biomasse initialement accumulées permet d'aborder les zones de combustion étudiées comme des situations représentatives d'incendies naturels ou anthropiques. De plus, les conditions de pédogenèse en milieu naturel neutre, caractérisé dans son ensemble par une faible altération, offrent une situation largement représentative de contextes pédologiques de l'Europe de l'Ouest en conditions d'interglaciaire.

A la différence des études précédentes généralement basées sur des analyses biomoléculaires et des analyses quantitatives de charbons de bois (Knicker *et al.*, 2008; Knicker, 2011) l'observation *in situ* privilégiée ici a permis de suivre à des pas de temps courts la dégradation des charbons de bois et des cendres associées. L'originalité des données tient surtout à la mise en évidence du rôle prépondérant de la colonisation par les bryophytes sur la biodégradabilité des composés pyrolytiques, charbons et cendres. L'hypothèse que cette colonisation endolithique ait créé les conditions propices à la

prolifération microbienne impliquée dans l'oxydation biotique des composés pyrolytiques comme observé dans les suivis expérimentaux (Knicker, 2011) peut être avancée. Une caractérisation approfondie des évolutions moléculaires synchrones des différents stades d'évolution pourrait permettre de préciser ces mécanismes de biodégradation. En l'état actuel des observations, le passage par une étape de transition montrant un faciès microstratifié compacté apparaît comme une phase essentielle dans le devenir des dépôts de combustion, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique. En effet, la microstratification compacte révélée ici peut être assimilée aux faciès de combustion les mieux préservés rencontrés en milieu archéologique dans une grande diversité de contextes de fossilisation, et jusqu'alors considérés comme intacts (Courty *et al.*, 1989; Courty, 2000). Cette ressemblance suggère que dans certaines conditions de milieux, la phase de colonisation endolithique serait une étape de préparation à l'altération, avant disparition totale par brassage biologique de la microstratification initiale, alors que dans d'autres cas, elle entraînerait la minéralisation des composés pyrolytiques, assurant ainsi leur stabilité à long terme. Cette dualité rappelle les deux voies d'évolution observée dans la colonisation de parois calcaires par des lichens endolithiques, et ce indépendamment du type de roche mère et des situations d'exposition (Courty, 1986): minéralisation et épigénie de la roche calcaire altérée par des phosphates calciques, entraînant une préservation du support dans un cas, dissolution et corrosion avec désintégration du support calcaire altéré plus ou moins rapide selon les conditions d'exposition aux agents météoriques dans un autre cas. Une étude comparée des faciès d'altération par des lichens endolithiques sous les conditions actuelles dans des contextes climatiques variés n'a permis de reconnaître que les effets de la voie de corrosion (Brasseur, 2005). De la même manière, l'étude présentée ici suggère que la dégradation rapide des composés pyrolytiques fait suite à la corrosion chimique lors du stade de colonisation par les lichens endolithiques. À ce jour, aucune étude ne semble avoir mentionné de cas de préservation intacte par fossilisation à court terme de résidus de combustion actuelle - anthropiques ou naturels - et plus particulièrement de résidus carbonisés ou de cendres carbonatées. La confrontation de ces deux situations conduit à proposer l'hypothèse que la fossilisation à long terme de composés pyrolytiques ou de faciès calcaires corrodés impliquerait l'inhibition de l'attaque microbienne dans des conditions spécifiques qui restent à élucider.

L'intense homogénéisation par le brassage des lombrics illustre le rôle largement documenté de la faune du sol sur la structuration des horizons de surface. Pour ce qui concerne les résidus carbonisés, la bioturbation apparaît bien ici comme un mécanisme physique de micro-fragmentation, favorisé par leur fragilisation préalable lors de la phase de compaction. Par contre, pour les cendres calcitiques, le brassage par les lom-

brics semble directement à l'origine de leur dilution progressive du fait de leur fine fragmentation au sein de la masse fine du sol. L'absence de modification significative de l'horizon B sous-jacent montre que le brassage des lombrics n'a pas entraîné d'incorporation de charbons ou domaines cendreaux en profondeur. Ce constat conduit à s'interroger quant à l'interprétation souvent formulée d'une descente de débris pyrolytiques accumulés en surface dans les horizons inférieurs par la faune du sol pour expliquer des charbons isolés au sein de la masse fine du sol non associés à des traces claires de combustion. La rapidité de la disparition des composés pyrolytiques par la bioturbation incite à discuter la signification de faciès de combustion relictuels en contexte archéologique montrant la juxtaposition de résidus carbonisés bien conservés et d'une masse fine excrémentale produite par l'activité de lombrics. La non dégradation des charbons par l'activité microbienne suggère que celle-ci pourrait avoir été inhibée soit en raison de conditions de pyrolyse spécifiques, soit du microenvironnement chimique des résidus carbonisés, voire d'une combinaison des deux facteurs. La préservation différentielle des résidus carbonisés en fonction des conditions de milieu déjà évoquée par de nombreux travaux reste à ce jour inexplicée. L'étude approfondie des contextes pédologiques de produits de combustion actuels et passés devrait permettre une clarification de ce problème pour mieux définir la signification des paléosignaux incendie.

CONCLUSION

Bien que restreinte à des conditions de milieux spécifiques, l'étude de l'évolution des faciès de combustion produits par de grands feux de nettoyage dans la forêt du domaine de Grignon (Ile-de-France) illustre l'importance d'une approche contextuelle en situation réelle pour bien appréhender les mécanismes de dégradation des produits de pyrolyse et corrélativement les processus d'évolution des faciès de combustion. Les résultats obtenus ne font que renforcer le débat quant à la signification de la récalcitrance élevée des charbons dans certains environnements, en comparaison d'autres artefacts paléontologiques et archéologiques (Scott, 2000; Kaal et Van Mourik, 2008). La disparition quasi totale après 36 mois d'évolution dans un contexte pédologique relativement neutre, et sans biais par des processus d'érosion, de tout résidu pyrolytique de feux originellement hauts de plusieurs mètres et ayant fait l'objet d'une combustion intense soulève la question de la signification des marqueurs considérés comme significatifs des premières traces de feux (Bellomo, 1994). Force est de constater que dans un contexte pédologique ubiquiste, une situation de combustion même bien structurée et entretenue ne peut avoir préservé de produits pyrolytiques résistants pendant quelques dizaines, centaines et encore moins

milliers d'années. De fait, cette réalité implique de formuler une hypothèse de travail qui n'avait jusqu'alors pas été envisagée : la persistance de composés pyrolytiques réfractaires vieux de plusieurs milliers, centaines et millions d'années pourrait traduire des conditions de pyrolyse spécifiques qui ne semblent pas avoir d'équivalent dans les conditions actuelles. Ce simple constat illustre le cadre strict fourni par les situations actuelles pour appréhender la signification des situations du passé. Il s'agit avant tout de maîtriser l'ensemble des facteurs et des mécanismes mis en jeu pour établir des corrélations entre données analytiques et processus pédologiques, plus particulièrement dans ce cas les processus d'évolution des faciès de combustion. L'absence d'analogues dans les contextes actuels pour expliquer la signification des enregistrements observés dans les situations du passé illustre bien les limites de l'actualisme, tout en montant l'importance de l'étude de situations contrôlées. Les recherches futures sur des contextes de combustion spécifiques favorables à la fossilisation à long terme des produits pyrolytiques devraient permettre d'élucider la signification des signatures de combustion reconnues dans des contextes anciens.

REMERCIEMENTS

Cet article est dédié à la mémoire de Pierre Guilloré en remerciement de son assistance technique. Nous exprimons toute notre reconnaissance à M. Le Professeur Jean Boulaïne pour nous avoir accueillie dans son laboratoire à l'INA-PG pendant de longues et fructueuses années. La collaboration scientifique de Nicolas Fedoroff et Fernand Pagé a été d'une aide précieuse dans la collecte et la gestion des données présentées dans cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- Bellomo R. V., 1994 - Methods of determining early hominid behavioural activities associated with the controlled use of fire at FxJj20 Main, Koobi Fora, Kenya. *Journal of Human Evolution* 27, 173-195.
- Beaufort L. de Garidel-Thoron T., Linsley B., Oppo D., Buchet N., 2003 - Biomass burning and oceanic primary production estimates in the Sulu Sea area over the last 380 kyr and the East Asian monsoon dynamics. *Marine Geology* 201 : 53-65
- Bradshaw R., Carcaillet C., Cordova C., Mooney S., Moreno, P., Prentice, I.C., Thonicke, K., Tinner, W., Whitlock C., Zhang Y., Zhao, Y., Anderson, R.S., Beer, R., Behling H., Briles C., Brown K.J., Brunelle A., Bush M., Camill P., Chu G.Q., Clark J., Colombaroli D., Daniels M., Dodson J., Doughty E., Edwards M.E., Fisinger W., Foster D., Gaillard M.-J., Gavin D.G., Gobet E., Haberle S., Hallett D.J., Higuera P., Hope G., Horn S., Inoue J., Kaltenrieder P., Kennedy L., Kong Z.C., Larsen C., Long C.J., Lynch J., Lynch B., McGlone M., Meeks S., Mensing S., Meyer G., Minckley T., Mohr J., Newnham R., Noti R., Oswald W., Pierce J., Richard P.J.H., Shuman B.J., Takahara H., Toney J., Turney, C., Umbanhower C., Vandergoes M., Vanniere B., Vescovi E., Walsh M., Wang X., Williams, N., Wilmshurst J., Zhang J.H., 2008 - Changes in fire activity since the Last Glacial

- Maximum: an assessment based on a global synthesis of charcoal data. *Climate Dynamics*, 30, 887–907.
- Brasseur B., 2005 - Séquence de bioaltération des carbonates en milieu karstique ouvert: comparaison de faciès actuels et fossiles (unité GII de Galeria, Atapuerca, Spain). *Mémoire du Muséum National d'Histoire Naturelle*, Paris.
- Campo J., Gimeno-García E., Andreu V., González-Pelayo O., Rubio J.L., 2008 - Aggregation of under canopy and bare soils in a Mediterranean environment affected by different fire intensities. *Catena* 74(3): 212–218.
- Carcaillet C., Almquist H., Asnong H., Bradshaw R. H. W., Carrión J. S., Gaillard M.-J.,
- Gajewski K., Haas J. N., Haberle S. G., Hadorn P., Müller S. D., Richard P. J. H., Richoz I., Rösch M., Sánchez Goñi M. F., von Stedingk H., Stevenson A. C., Talon B., Tardy C., Tinner W., Tryterud E., Wick L., Willis K. J., 2002 - Holocene biomass burning and global dynamics of the carbon cycle. *Chemosphere* 49, 845–863.
- Cerda A., Doerr S.H., 2008 - The effect of ash and needle cover on surface runoff and erosion in the immediate post-fire period. *Catena*, 74, 256–263.
- Courty M.-A., 1986 - Quelques faciès d'altération de fragments carbonatés en grottes et abris sous roche préhistoriques. *Bull. de l'Association Française pour l'étude du Quaternaire*, 27–28, 281–290.
- Courty M.-A., 2000 - Micro-facies analysis assisting archaeological stratigraphy. In « *Earth Science and Archaeology* », P. Goldberg, V.T. Holliday and R. Ferring (eds). Plenum Publishing CO. 205–239.
- Courty M.-A., Goldberg P., Macphail R.I., 1989 - Soil, micromorphology and archaeology. *Cambridge Manuals in Archaeology*. Cambridge University Press, 344 p.
- Daniau A.-L., Harrison S.P., Bartlein P.J., 2010 - Fire regimes during the last glacial, *Quaternary Science Reviews*, 29, 2918–2930.
- Daniau A.-L., Sánchez Goñi M.F., Duprat J., 2009 - Last glacial fire regime variability in western France inferred from microcharcoal preserved in the marine sequence MD04-2845, Bay of Biscay. *Quaternary Research*, 71 (3), 385–396.
- DeBano L. F., Neary D. G., Folliott P. F., 1998 - *Fire's effects on ecosystems*. New York, NY: John Wiley and Sons.
- De la Rosa J.M., González-Pérez J.A., González-Vázquez R., Knicker H., López-Capel E., Manning, D.A.C., González-Vila F.J., 2008 - Use of Pyrolysis/GC-MS combined with thermal analysis to monitor fire induced C and N forms changes in forest soil organic matter. *Catena* 74: 296–303.
- Doerr S.H., Ferreira A.J.D., Walsh R.P.D., Shakesby R.A., Leighton-Boyce G., Coelho C.O.A. - 2003. Soil water repellency as a potential parameter in rainfall-runoff modelling: experimental evidence at a point to catchment scales from Portugal. *Hydrological processes*, 17: 363–377.
- Doerr S.H., Shakesby R.A., Blake W.H., Humphreys G.S., Chafer C., Wallbrink P.J., 2006 - Effects of contrasting wildfire severity on soil wettability in Australian eucalypt catchments. *Journal of Hydrology*, 319, 295–311.
- Filion L., 1984 - A relationship between dunes, fire and climate recorded in the Holocene deposits of Québec, *Nature*, 309 (7), 543–546.
- Goldberg E.D., 1985 - *Black Carbon in the Environment*. John Wiley and Sons, New York.
- 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 (3): 332–342
- Hockaday A.M. Grannas S. Kim, Hatcher P.G., 2006 - Direct molecular evidence for the degradation and mobility of black carbon in soils from ultrahigh-resolution mass spectral analysis of dissolved organic matter from a fire-impacted forest soil, *Organic Geochemistry* 37 (501–510).
- Kaal J. and Van Mourik J. M., 2008 - Micromorphological evidence of black carbon in colluvial soils from NW Spain. *European Journal of Soil Science*, 59 (6):1133–1140.
- Knicker H., Hilsher A., Gonzales-Vila F. J., Almendros G., 2008 - A new conceptual model for the structural properties of char produced during vegetation fires. *Organic geochemistry* 39: 935–938.
- Knicker H., 2011 - Pyrogenic organic matter in soil: Its origin and occurrence, its chemistry and survival in soil environments. *Quaternary International*, doi:10.1016/j.quaint.2011.02.037.
- Mooney S., Harrison S.P., Bartlein P.J., 2011 - Late Quaternary Fire Regimes in Australasia, *Quaternary Science Reviews*, 30, 28–46.
- Pinter N., Fiedel F., Keeley J.E., 2011 - Fire and vegetation shifts in the Americas at the vanguard of Paleoindian Migration. *Quaternary Science Reviews* 30, 269–272.
- Power M.J., Marlon J., Ortiz N., Bartlein P.J., Harrison S.P., Mayle F.E., Ballouche A., Schneur E.A., 1966 - Schneur, Oxidation of graphitic carbon in certain soils, *Science* 151 (1966), pp. 991–992.
- Scott A.C., 2000 - Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164, 281–329.
- Skjemstad J.O., Clarke P., Taylor J.A., Oades J.M., McClure S.G., 1996 - The chemistry and nature of protected carbon in soil, *Australian Journal of Soil Research* 34 (1996), pp. 251–271
- Sponholz B., Baumhauer R. P., Henningsen F., 1993 - Fulgurites in the southern Central Sahara, Republic of Niger and their palaeoenvironmental significance. *The Holocene* 3(2), 97–104.
- 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(1): 36–43.
- Teixeira J.R., Dixon J.B., White G.N., Newsom L.A., 2002 - Charcoal in soils: A preliminary view. In J.B. Dixon and D.G. Schulze (ed.) *Soil mineralogy with environmental applications*. SSSA Book Ser. 7. SSSA, Madison, WI. pp. 819–830.
- Turner R., Roberts N., Jones M.D., 2008 - Climatic pacing of Mediterranean fire histories from lake sedimentary microcharcoal. *Global and Planetary Change* 63 (2008) 317–324.