Document généré le 19 juil. 2025 10:54

Géographie physique et Quaternaire

Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols : exemple de quelques sols des Alpes

A Taphonomic View of the Wood Charcoal Stratigraphy and Dating in Soil: A Case Study of Some Soils from the French Alps

Aspetti della stratigrafia e della datazione dei carboni nei suoli : esempio di qualche suolo delle Alpi

Christopher Carcaillet et Brigitte Talon

Volume 50, numéro 2, 1996

URI : https://id.erudit.org/iderudit/033091ar
DOI : https://doi.org/10.7202/033091ar

Aller au sommaire du numéro

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)
1492-143X (numérique)

Découvrir la revue

Citer cet article

Carcaillet, C. & Talon, B. (1996). Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols : exemple de quelques sols des Alpes. *Géographie physique et Quaternaire*, *50*(2), 233–244. https://doi.org/10.7202/033091ar

Résumé de l'article

Les phénomènes d'enfouissement et de fragmentation des charbons de bois des sols de montagne sont mis en évidence par l'analyse anthracologique et par des datations absolues au ^{14}C de quatre profils pédologiques provenant des Alpes françaises. Ces dernières s'avèrent indispensables mais insuffisantes pour comprendre le mode de stratification. Les datations doivent être précédées d'une analyse des assemblages anthracologiques à la fois qualitative (composition taxonomique) et quantitative lorsque les sols sont suffisamment riche en charbons. Le processus de stratification dans les sols n'est pas comparable à celui que l'on observe dans un lac ou une tourbière; les racines, la pédofaune et les processus d'érosion contribuent à créer une vitesse différentielle d'enfouissement des charbon dans les sols. Cela conduit à une stratification dite « en écailles » des charbons appartenant à un même taxon. Les assemblages et les datations permettent d'identifier des phases d'incendies subies par la végétation sur la station MAUR 6 située en moyenne altitude (1770 m). Quant à QUEYRAS 2, en haute altitude (2670 m), il ne semble pas approprié pour révéler, de par sa composition en charbon, différentes phases d'incendies et surtout les plus anciennes; le réseau racinaire mais surtout les alternances de gel-dégel participent à la réduction de taille des fragments dans les sols.

Tous droits réservés © Les Presses de l'Université de Montréal, 1996

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne.

https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche.

https://www.erudit.org/fr/

Géographie physique et Quaternaire, 1996, vol. 50, n° 2, p. 233-244, 7 fig., 2 tabl.

ASPECTS TAPHONOMIQUES DE LA STRATIGRAPHIE ET DE LA DATATION DE CHARBONS DE BOIS DANS LES SOLS : EXEMPLE DE QUELQUES SOLS DES ALPES

Christopher CARCAILLET* et Brigitte TALON, Institut méditerranéen d'Écologie et de Paléoécologie, URA-CNRS 1152, Laboratoire de Botanique et d'Écologie méditerranéenne, Case 461, FST Saint-Jérôme, F-13397 Marseille cedex 20, France.

RÉSUMÉ Les phénomènes d'enfouissement et de fragmentation des charbons de bois des sols de montagne sont mis en évidence par l'analyse anthracologique et par des datations absolues au ^{14}C de quatre profils pédologiques provenant des Alpes françaises. Ces dernières s'avèrent indispensables mais insuffisantes pour comprendre le mode de stratification. Les datations doivent être précédées d'une analyse des assemblages anthracologiques à la fois qualitative (composition taxonomique) et quantitative lorsque les sols sont suffisamment riche en charbons. Le processus de stratification dans les sols n'est pas comparable à celui que l'on observe dans un lac ou une tourbière ; les racines, la pédofaune et les processus d'érosion contribuent à créer une vitesse différentielle d'enfouissement des charbon dans les sols. Cela conduit à une stratification dite « en écailles » des charbons appartenant à un même taxon. Les assemblages et les datations permettent d'identifier des phases d'incendies subies par la végétation sur la station MAUR 6 située en moyenne altitude (1770 m). Quant à QUEYRAS 2, en haute altitude (2670 m), il ne semble pas approprié pour révéler, de par sa composition en charbon, différentes phases d'incendies et surtout les plus anciennes ; le réseau racinaire mais surtout les alternances de gel-dégel participent à la réduction de taille des fragments dans les sols.

ABSTRACT *A taphonomic view of the wood charcoal stratigraphy and dating in soil: A case study of some soils from the French Alps.* The burial and fragmentation processes are investigated by anthracological analysis and by absolute ^{14}C dating of four pedological profiles from the French Alps. Absolute ^{14}C dates are essential but insufficient for the understanding of the mode of stratification. The dates must be considered after a detailed qualitative (taxonomic composition) and quantitative analysis of anthracological assemblages. The soil stratification process does not compare with that in lake or peat-bog sediments. Action of roots, soil fauna and erosion processes mean burial of wood charcoal in the soil occurs at different speeds. The result is a stratification in "scales". The assemblages and dates allow us to recognize three fire phases on the stand MAUR 6 at middle altitude (1770 m a.s.l.). On QUEYRAS 2, at high altitude (2670 m a.s.l.), wood charcoal assemblages did not reveal the oldest fire phases. The network of roots and mainly the frost-thaw reduces the size of wood charcoal fragments in the soil.

RIASSUNTO *Aspetti della stratigrafia e della datazione dei carboni nei suoli: esempio di qualche suolo delle Alpi.* Attraverso l'analisi pedoantracologica e le datazioni assolute al ^{14}C di quattro profili pedologici provenienti dalle Alpi francesi, vengono messi in evidenza i fenomeni di infossamento e di frammentazione dei carboni nei suoli di montagna. Le datazioni sono indispensabili ma insufficienti per comprendere la stratigrafia dei carboni. Le datazioni debbono essere precedute da un'analisi degli insiemi antracologici sia qualitativi (composizione tassonomica) che quantitativi allorchè i suoli sono ricchi in carbone. Il processo di stratificazione nei suoli è diverso da quello nei laghi o nelle torbiere ; infatti le radici, la pedofauna ed i processi di erosione provocano una diversa velocità di infossamento dei carboni. Quelli appartenenti allo stesso taxon hanno così una stratificazione detta "a scaglie". Per la stazione MAUR 6, situata a 1770 m d'altitudine, l'insieme delle datazioni permette di identificare gli incendi subiti dalla vegetazione, mentre la stazione di QUEYRAS 2, situata a 2670 m d'altitudine, per la ripartizione dei carboni, non sembra idonea per mettere in evidenza le diverse fasi d'incendio soprattutto le più antiche ; il feltro delle radici, ma soprattutto l'alternanza gelo-disgelo, contribuiscono alla riduzione della taglia dei frammenti di carbone.

Manuscrit reçu le 5 juillet 1995 ; manuscrit revisé accepté le 20 décembre 1995
* Adresse électronique : M9203683@EDUC-001.U-3MRS.FR

INTRODUCTION

La pédoanthracologie permet de reconstituer les paléovégétations ligneuses incendiées à l'aide de l'identification et la datation des charbons de bois contenus dans les sols. Bien que le principe soit assez ancien (Bryson *et al.*, 1965 ; Sorenson *et al.*, 1971 ; Jacquiot *et al.* 1973a, le développement de cet outil est récent (Thinon, 1978 ; Payette et Gagnon, 1985 ; Albert et Minc, 1987 ; Thinon, 1992 ; Hopkins *et al.*, 1993 ; Tessier *et al.*, 1993 ; Berli *et al.*, 1994 ; Di Pasquale, 1994 ; Vernet *et al.*, 1994 ; Carcaillet et Thinon, 1996). Excepté Thinon (1992), les auteurs ne se sont pas attachés à faire progresser la méthodologie.

L'un des aspect méthodologiques concerne la stratification des charbons dans les sols. Cet aspect est primordial pour les reconstitutions paléoenvironnementales. En effet, la reconstitution de la composition et des changements de végétations sous-entend de pouvoir préciser quand ces végétations se sont développées et quand elles ont subi des changements. Cela implique de pouvoir dater la stratification des assemblages de charbons dans les sols. Au regard des dates obtenues sur des fragments de charbons, Hopkins *et al.* (1993) affirment qu'il n'existe pas de relation entre la profondeur d'enfouissement et l'âge au ^{14}C. D'autres auteurs admettent d'emblée l'existence d'une stratification avec le soutien des datations au ^{14}C (Berli *et al.*, 1994 ; Vernet *et al.*, 1994 ; Carcaillet et Thinon, 1996) ou sans celles-ci (Tessier *et al.*, 1993 ; Di Pasquale, 1994). Des éléments d'interprétation sont avancés pour expliquer les facteurs d'enfouissement des charbons dans des sols méditerranéens et tropicaux (Thinon, 1992 ; Vernet *et al.*, 1994 ; Boulet *et al.*, 1995) : les termites, les vers de terre et le colluvionnement participeraient sous ces climats à enfouir les charbons déposés sur le sol. En région subpolaire, l'action fouisseuse de la pédofaune est négligeable ; les charbons restent alors en surface des sols, sauf lorsque des dépôts éoliens ou du colluvionnement provoquent leur enfouissement (Brysson *et al.*, 1965 ; Payette et Gagnon, 1985 ; Payette et Filion, 1993).

Cet article livre des éléments de réflexion sur l'interprétation des profils pédoanthracologiques et discute de la notion de stratification particulière aux sols des Alpes par l'inventaire des agents responsables de l'enfouissement, du brassage et de la fragmentation des charbons. En se fondant sur ces informations, quatre profils pédoanthracologiques, complétés de datations au ^{14}C par AMS, sont analysés qualitativement (composition taxonomique) et quantitativement (masse des charbons par niveau et par kilogramme de terre sèche) permettant de discuter de l'existence et des limites de la stratification des charbons dans les sols des Alpes. Enfin, le choix du matériel à mesurer pour dater les événements est évoqué en proposant une méthode.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

PRÉLÈVEMENT ET TAMISAGE

Les quatre sondages utilisés pour cette démonstration ont été échantillonnés dans le cadre d'une étude sur l'histoire et l'évolution de la limite supérieure des arbres dans les Alpes françaises. Trois d'entre eux (MAUR 1, MAUR 4 et MAUR 6) proviennent du bassin versant de Saint-Michel-de-Maurienne, en Savoie (45°15'N-6°30'E), et le dernier (QUEYRAS 2) de la vallée du Guil (44°44'N-7°00'E), dans les Hautes Alpes (fig. 1). Ces quatre prélèvements sont extraits de deux transects altitudinaux de sondages pédoanthracologiques régulièrement étagés permettant d'étudier les changements de composition des communautés ligneuses incendiées pendant l'Holocène.

Dans chacun des sites d'étude, le choix de la station de prélèvement est en accord avec les recommandations de Carcaillet et Thinon (1996) excluant les sols proches des torrents, les sols hydromorphes, les sols ayant subi des travaux de terrassement, etc. Le prélèvement consiste à creuser une fosse pédologique et d'en extraire 10 à 20 kg de terre à différents niveaux de profondeur en échantillonnant du bas vers le haut du profil (Thinon, 1992). L'épaisseur des niveaux est fonction de l'épaisseur des horizons pédologiques définis sur le terrain, principalement d'après des critères de texture, de couleur et de richesse en matières organiques. Lorsque l'épaisseur des horizons dépasse 30 cm, plusieurs niveaux pédoanthracologiques sont échantillonnés.

Cette terre est ensuite tamisée, selon le protocole proposé par Thinon (1992) et repris par Carcaillet et Thinon (1996). Une flottation dans une cuve rotative permet de séparer un surnageant contenant la plus grande partie des charbons du prélèvement, en mélange avec les racines et la matière organique fraîche du sol. Cette phase critique risque de fragmenter les charbons, mais notre expérience nous permet de souligner que cela est négligeable. Le surnageant très riche en charbons est récolté sur un tamis de 400 μm, puis il est

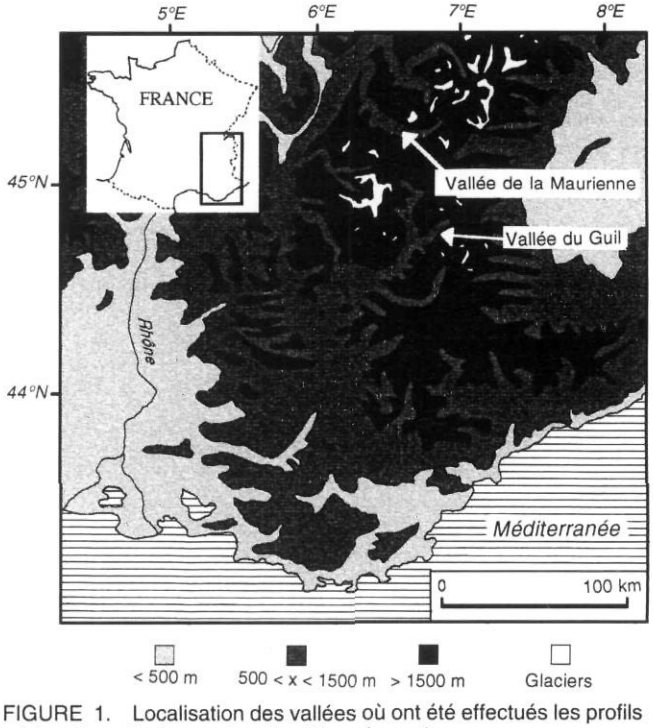

FIGURE 1. Localisation des vallées où ont été effectués les profils pédoanthracologiques dans les Alpes françaises.

Map of the French Alps showing the location of the two valleys where the pedoanthrcological profiles were sampled.

traité à l'aide d'un défloculant ne contenant pas de carbone (P_2O_4Na), séché, puis enfin trié sous une loupe binoculaire pour récupérer manuellement les charbons. Le culot de la cuve, quant à lui, est tamisé de façon ménagée sous un courant d'eau sur une colonne de trois tamis (5 mm, 2 mm et 400 μm). Le refus des tamis de 2 mm et 400 μm est mis à tremper dans une solution défloculante (P_2O_4Na) afin de déstructurer les derniers agrégats. Enfin, les charbons sont extraits de la fraction minérale par lévigation. Tous les charbons sont nettoyés, un par un, de la pellicule de limons et d'argile qui les recouvre à l'aide d'un générateur d'ultrasons. Cette dernière opération a pour but de préparer les fragments pour l'observation microscopique, en améliorant la qualité des trois plans anatomiques (plans transversal, longitudinal tangentiel et longitudinal radial).

L'identification anatomique s'effectue au microscope épiscopique (grossissements ×200, ×500 et ×1000), à l'aide d'ouvrages d'anatomie du bois (Greguss, 1955, 1959 ; Jacquiot, 1955 ; Jacquiot *et al.*, 1973b ; Schweingruber, 1978, 1990) et par comparaison avec les échantillons de l'anthracothèque de référence du laboratoire (Institut méditerranéen d'Écologie et de Paléoécologie). Les fragments de bois mort non carbonisé, calcifié ou non, n'ont pas la même apparence *sous le microscope que le charbon de bois. Il n'y a aucun* risque quant à une confusion possible entre des charbons et ces différents matériels ligneux.

PRÉSENTATION DES DONNÉES

Les données anthracologiques sont présentées dans un diagramme sous forme quantitative et qualitative en marge de la description du profil de sol (fig. 2, 3, 4 et 5). L'« anthracomasse spécifique » (Thinon, 1992) est une expression quantitative des données anthracologiques correspondant au rapport entre d'une part la masse totale (en milligrammes) des charbons extraits d'un niveau et d'autre part la masse totale de terre sèche (en kilogrammes) de taille inférieure à 5 mm. L'unité retenue est la partie pour le million (ppm). Dans un niveau, la masse de chaque taxon par rapport à la masse totale de terre sèche permet de calculer une valeur quantitative (en ppm) appelée « anthracomasse spécifique taxonomique » (AST), permettant de comparer quantitativement et qualitativement les taxons des différents niveaux d'un même sondage ou des niveaux de sondages différents. Les valeurs quantitatives ont la propriété de représenter chaque espèce de façon indépendante les unes des autres. Les AST sont figurées sous la forme d'un histogramme dans lequel les valeurs inférieures à 1 ppm sont signalées par un trait pointillé. Lorsque toutes les AST d'un même profil sont inférieures ou très peu différentes de 1 ppm, comme dans QUEYRAS 2 (fig. 2) et MAUR 1 (fig. 3), les résultats sont indiqués en clair sous la forme de nombre.

La description des sols concorde avec la classification dite « française » (Duchaufour *et al.* 1976). Le nom du sol selon la nomenclature dite « américaine » est signalée entre parenthèses après le nom de la classification « française ». Les noms des plantes respectent *Flora Europaea* (Tutin *et al.*, 1964-1980).

DATATIONS

DATATIONS ABSOLUES ET DATATIONS RELATIVES

La datation des charbons aide à comprendre leur répartition dans les sols (Thinon, 1992). Mais il est impossible de dater tous les fragments d'un profil, pour des raisons d'ordre financier d'une part et pratique d'autre part, à cause de la très faible masse de certains fragments (tabl. I). La masse limite inférieure pour dater du charbon au ^{14}C par AMS est de 1 mg. Il est donc indispensable d'essayer de comprendre la structure d'un profil pédoanthracologique, afin de limiter le nombre des datations absolues et d'extrapoler adéquatement les résultats en datant de façon relative.

FRAGMENT DE CHARBON DE BOIS À DATER

Le choix du fragment à dater va dépendre du niveau dans lequel il se trouve et de l'intérêt que le taxon représente pour notre problématique paléoenvironnementale. Trois hypothèses peuvent présider à ce choix :

• *Hypothèse n° 1* : il existe une stratigraphie dans les sols (Thinon, 1992 ; Berli *et al.*, 1994 ; Vernet *et al.*, 1994 ; Boulet *et al.*, 1995). Dans ce cas, le choix du taxon qui sera daté importe peu. Il s'agit seulement de replacer dans le temps l'évolution de la végétation : époque de la phase d'incendie la plus ancienne (bas du profil) et celle de la plus récente (sommet du profil).

• *Hypothèse n° 2* : il n'existe pas de stratigraphie dans les sols (Bryson *et al.*, 1965 ; Payette et Gagnon, 1985 ; Hopkins *et al.*, 1993). La reconstitution chronologique des phases d'incendie ne s'appuie pas sur la structure des profils mais sur un grand nombre de dates.

• *Hypothèse n° 3* : la stratigraphie existe mais subit des perturbations. L'analyse à la fois qualitative et quantitative doit mettre en évidence une distribution des assemblages en fonction du temps, c'est-à-dire une organisation verticale des profils, même grossière. En se fondant sur cette analyse, les charbons à dater sont choisis, en profondeur, parmi les espèces absentes des niveaux supérieurs, et en surface, parmi les espèces absentes des niveaux de profondeur.

Les charbons sélectionnés pour être datés sont préalablement traités en vue d'éviter toute pollution provenant de matériel organique plus ancien ou plus récent. Un nettoyage mécanique des surfaces est nécessaire pour retirer les parti*cules accolées et les fragments de radicelles qui traversent* le charbon. Puis ils sont mis à tremper pendant 24 heures dans une solution de tetra-sodium diphosphate ($Na_4P_2O_7$) afin d'extraire les acides humiques et fulviques abondamment adsorbés par les charbons. L'opération est répétée jusqu'à ce que les acides organiques ne soient plus mis en solution. En outre, le laboratoire de mesures au ^{14}C par AMS traite les charbons à la soude (NaOH) en vue de détruire les humates.

RÉSULTATS

QUEYRAS 2

Ce sondage a été effectué à 2670 m d'altitude dans le vallon de l'Aigue Agnelle, de la vallée du Guil, dans le parc

TABLEAU I

Anthracomasse moyenne (en mg) des fragments de charbons par niveau pédoanthracologique

Profils	QUEYRAS 2					MAUR 1			MAUR 4						MAUR 6					
Niveaux	I	II	III	IV	V	I	II	III	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
Abies alba											0,67			1,31			0,75	1,19	1,31	0,81
Juniperus sp.				0,3	0,09	0,80									1,36	0,89		0,31		
Pinus cembra	1,66	0,28	0,07	0,21	0,04	0,23	0,43	0,53	0,50	0,68	2,83	3,70	1,39	1,12		7,30	0,84	2,49	1,41	2,06
Pinus section *sylvestris*															6,52	5,27	3,64	2,19	1,94	1,58
Pinus sp.															1,10	1,14	1,35	0,81	0,71	0,54
type *Larix-Picea*		0,01			0,07				<0,01	< 0,01										
Acer cf. *platanoides*																0,76	0,87	4,55	3,16	0,68
Acer pseudoplatanus										5,16	0,75	4,95	0,40	10,24			3,95	1,21	0,33	0,56
Acer sp.						< 0,01									0,22	9,22		5,83	0,45	
Alnus glutinosa/incana											0,88	0,70								
Alnus viridis										< 0,01	0,80		0,63		7,67	1,63				
Betula sp.								1,54			1,04	3,89	0,97			10,27	1,04	1,33	0,79	0,44
Ericacea						1,20				0,25					1,25					
Fabaceae cf. Ononis																0,53				
Populus sp.										< 0,01							1,51			
Rosaceae maloideae											0,87		0,90					1,47	0,38	
Salix sp.																	0,92	0,31		
Sambucus racemosa								1,24												1,90
cf. *Sambucus*																	2,14	1,56	2,67	
cf. *Vaccinium myrtillus*							0,63		0,23	1,17			0,37							
Vaccinium sp.	0,08																			
Indéterminables	0,15		0,08	0,84		0,79	0,68	0,50	1,19	2,67	1,48	2,81	0,59	0,79	1,05	2,58	0,94	1,33	0,65	0,87

naturel régional du Queyras, Alpes du Sud (fig. 1). Il prend place dans un transect réalisé le long de la vallée, depuis la limite actuelle de la forêt à 1950 m jusqu'à 2900 m dans les pelouses alpines. Le site est exposé plein sud. La végétation est constituée par une pelouse alpine à *Carex curvula*, *Festuca pumila*, *Avena montana*, *Potentilla grandiflora*, *Geum montanum*, *Antennaria dioica*, ... sur schistes lustrés.

Le sondage (fig. 2) profond de 90 cm, révèle un ranker cryptopodzolique (USA : *typic cryorthod*) à tendance colluviale et structure rhyzogène dans lequel nous avons délimité cinq niveaux. Tous les fragments de charbons ont une taille comprise entre 800 et 400 μm. L'anthracomasse totale est très faible pour l'ensemble du sondage puisqu'elle dépasse à peine 10 mg. Dans ces conditions, il n'est pas possible d'envisager l'étude sous un aspect quantitatif.

Le pin cembro (*Pinus cembra*) est présent sur toute la hauteur du profil. Le genévrier (*Juniperus* sp.) n'a été trouvé que dans les deux niveaux profonds, *Vaccinium* sp. qu'en surface, et le type *Larix-Picea* tout au fond et dans le niveau II. Ces taxons sont tous héliophiles sauf le pin cembro, qui peut être qualifié d'espèce de demi-ombre. Il est difficile de dégager de ces assemblages une certaine stratigraphie.

Nous n'avons pu choisir ni les niveaux ni les essences que nous voulions dater. Les datations ont été mesurées sur les deux seuls fragments dont la masse le permettait, l'un dans le niveau de surface (entre 6 et 20 cm) l'autre dans le niveau IV (entre 50 et 70 cm). Les deux dates obtenues sur des charbons de *Pinus cembra* sont très semblables : ± 1420 cal. BP (1535 ± 45 BP) et ± 1390 cal. BP (1475 ± 70 BP) respectivement dans les niveaux I et IV (tabl. II).

Ni les datations ni la répartition des taxons dans le profil ne permettent de soutenir l'hypothèse d'une stratification des charbons dans ce sol.

MAUR 1 (hypothèse n° 1)

Le sondage MAUR 1 (fig. 1 a été prélevé à 2360 m d'altitude en limite supérieure de l'étage subalpin. Le site, bien protégé du ruissellement vers l'aval, est une petite combe à neige placée au pied d'une courte et faible pente d'environ 100 m de dénivelé. Le sol, profond de 50 cm (fig. 3), est édifié sur des schistes du Permo-Carbonifère. C'est un sol brun acide (USA : *typic dystrochrept*) à tendance cryptopodzolique (USA : *cryorthod*) et structure rhyzogène. On reconnaît quatre horizons. Le plus profond, très riche en altérites, n'a pas été échantillonné. Actuellement, une pelouse à *Nardus stricta*, *Festuca rubra*, *Carex sempervirens* et *Poa alpina* occupe cette station exposée au sud-ouest.

Le niveau III possède l'anthracomasse spécifique la plus élevée du sondage (8 ppm) ; c'est dans ce niveau que *Pinus cembra* est le plus abondant. Cette espèce forestière tolérante à l'ombre est présente en assemblage avec *Betula* sp., *Sambucus racemosa* et une Ericaceae, taxons plus héliophiles mais tolérants à l'ombre. Les niveaux I et II comportent d'autres végétaux : Ericaceae, dont *Vaccinium* cf. *myrtillus*, mais surtout *Juniperus* sp. et *Acer* sp. Le pin cembro (*Pinus cembra*) est en quantité semblable dans les quatre niveaux. Le poids moyen des charbons est très faible (tabl. I) et correspond uniquement à des petits fragments d'un diamètre voisin de 800 μm.

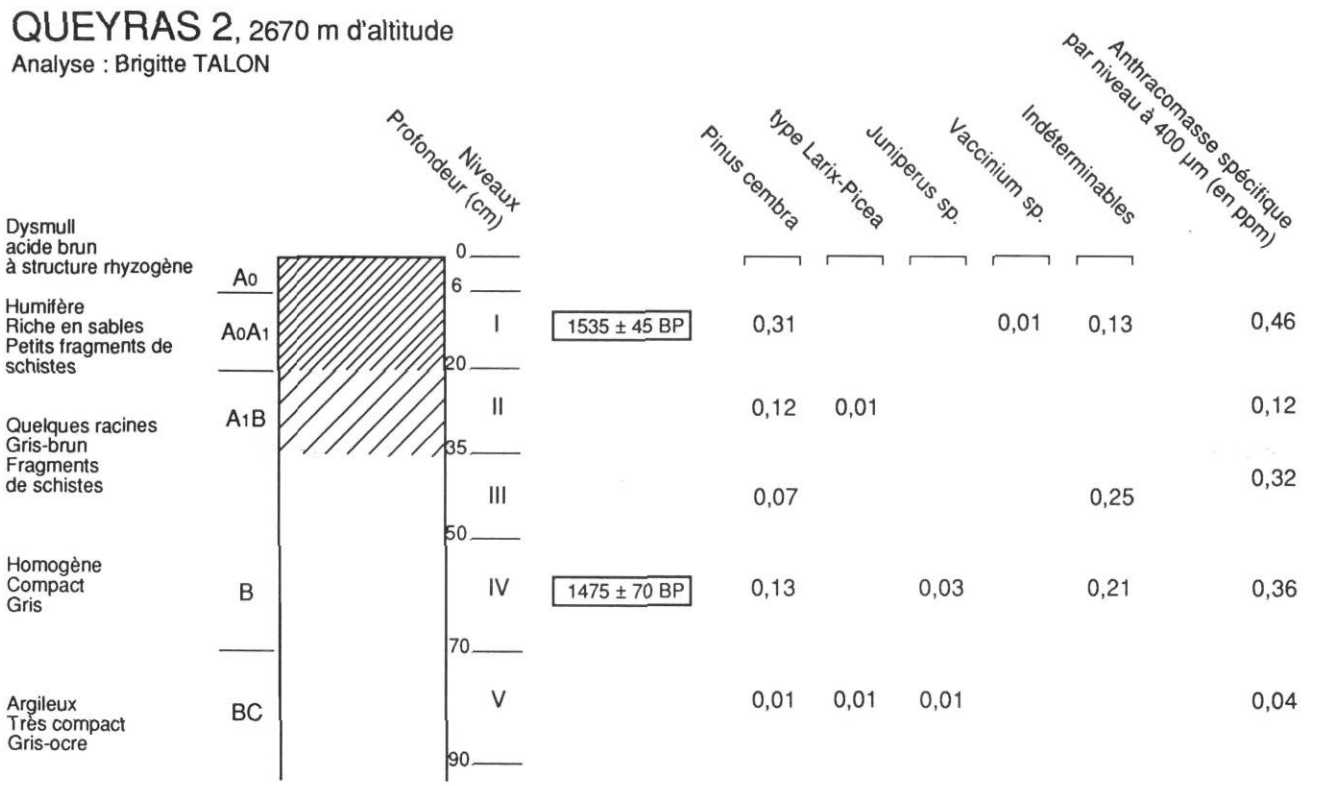

FIGURE 2. Profil pédoanthracologique de QUEYRAS 2, à 2670 m d'altitude, Aigue Agnelle, vallon du Guil, massif du Queyras, Alpes françaises du sud. Les valeurs représentent les anthracomasses spécifiques par taxon (AST) en mg de charbon/kg de terre fine sèche (ppm). La végétation actuelle est constituée d'une pelouse à *Carex curvula*, *Festuca pumila*, *Avena montana*, *Poa violacea*, *Gregoria vitalliana*, *Potentilla grandiflora*, *Geum montanum*, ... Le profil se situe au pied d'une courte pente. La pente de la station exposée au sud est inférieure à 5°.

Pedoanthracological profile of QUEYRAS 2 at 2670 m a.s.l., Aigue Agnelle, Guil valley, massif du Queyras , south French Alps. Values indicate the specific anthracomass per taxon (SAT) in mg of wood charcoal/ kg of the fine and dry component of the soil (ppm). The present day vegetation is a meadow consisting mainly of Carex curvulea, Festuca pumila, Avena montana, Poa violacea, Gregoria vitalliana, Potentilla grandiflora, Geum montanum. *The profile is located at the foot of a short slope. The slope of the south exposed stand is less than 5°.*

Pour dater ce profil, nous avons opté pour l'hypothèse n° 1, mais soucieux cependant de dater au ^{14}C le même matériel biologique, donc un taxon présent dans tous les niveaux (Thinon, 1992), nous avons choisi *Pinus cembra*. Les dates des niveaux I et III (tabl. II) sont respectivement de ± 3700 cal. BP (3415 ± 85 BP) et ± 4100 cal. BP (3745 ± 75 BP). La date obtenue en surface ne soutient pas mais ne rejette pas pour autant l'hypothèse d'une stratigraphie régulièrement vieillissante du haut vers le bas, alors que la composition taxonomique du profil semble indiquer deux phases d'incendies se traduisant par deux types d'assemblages, l'un tolérant à l'ombre (MAUR 1 III) et l'autre plus héliophile (MAUR 1 II et I).

MAUR 4 (hypothèse n° 1)

Ce sondage effectué à 1960 m d'altitude est en limite inférieure de l'étage subalpin. La végétation actuelle est un pâturage composé principalement de *Nardus stricta* et *Festuca rubra*. La pente générale de la station exposée au sud-ouest est assez faible (10°). Le sol, profond de 95 cm, est de type brun acide (USA : *typic dystrochrept*) à tendance colluviale et structure rhyzogène, édifié sur grès du Houiller. Six niveaux pédoanthracologiques ont été retenus (fig. 4).

Trois types d'assemblages ont été distingués au vu de la composition taxonomique et des anthracomasses spécifiques par niveau. Le premier type d'assemblage est composé uniquement du niveau VI qui contient trois espèces tolérantes à l'ombre (*Abies alba*, *Pinus cembra*, *Acer pseudoplatanus*) et dont l'anthracomasse spécifique est particulièrement faible. Le second type d'assemblage est représenté par les niveaux V, IV et III. Leur anthracomasse spécifique est la plus élevée du profil, et outre les mêmes taxons que le niveau du fond, ils contiennent des héliophiles : *Betula* sp., *Alnus glutinosa/ incana* et Rosaceae maloideae. Enfin les deux niveaux de surface représentent la troisième catégorie d'assemblage remarquable par sa faible anthracomasse spécifique, par la présence du type *Larix-Picea*, de *Populus* sp., d'Ericaceae dont *Vaccinium* cf. *myrtillus*, et par la chute de l'AST de *Pinus cembra*. Les assemblages caractérisent le passage d'un milieu fermé à un milieu ouvert, puis à un changement de la flore. Il semble qu'une stratigraphie soit révélée au travers de cette évolution régressive des assemblages.

L'hypothèse n° 1 (existence d'une stratigraphie) a été choisie pour dater ce profil. Deux dates au ^{14}C par AMS sur *Pinus cembra* ont été obtenues (tabl. II) : ± 5760 cal. BP (4975

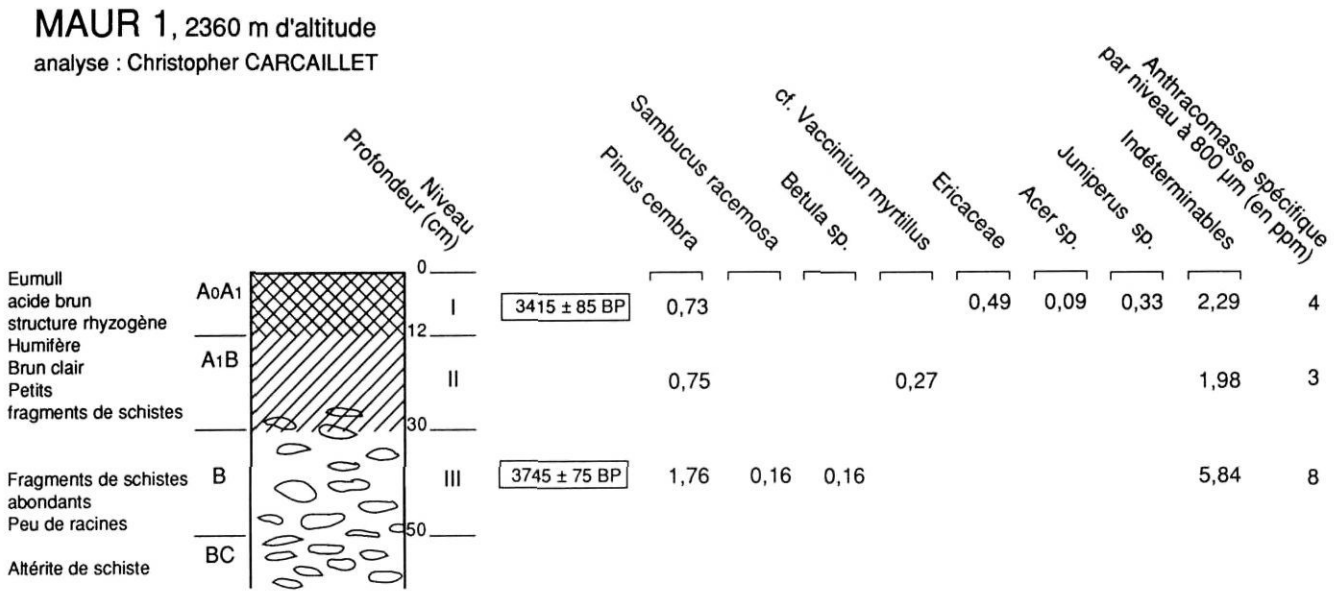

FIGURE 3. Profil pédoanthracologique de MAUR 1, à 2360 m d'altitude, bassin versant de Saint-Michel-de-Maurienne (45°15'N, 6°30'E), vallée de la Maurienne, Alpes françaises du nord. Les valeurs représentent l'AST en ppm. La végétation actelle se constitue d'une pelouse à *Festuca rubra*, *Nardus stricta*,... La pente exposée au sud-ouest est inclinée de 15-20°. Le sondage a été réalisé dans une dépression au pied d'une courte pente d'environ 100 m de dénivelé.

Pedoanthracological profile of MAUR 1, at 2360 m a.s.l., Maurienne valley, north French Alps. Values indicate the SAT (ppm). The present day vegetation is a meadow consisting mainly of Festuca rubra, Nardus stricta, *etc. The south-west exposed slope is inclined of 15-20°. The sampling was done in a little topographical depression on the foot of a slope with 100 m of denivellation.*

TABLEAU II

Caractéristiques des fragments de charbons datés par AMS pour les sondages QUEYRAS 2, MAUR 1,4, et 6

Niveaux	Taxons anthracologiques	Masse de	Nombre de fragments	Dates non calibrées (BP)	Références*	Dates calibrées (BP)
		l'échantillon (mg)				
MAUR 1 I	*Pinus cembra*	1,6	2	3415 ± 85	AA-12483	± 3700
MAUR 1 III	*Pinus cembra*	3,7	1	3745 ± 75	AA-12484	± 4100
MAUR 4 II	*Pinus cembra*	6,8	3	4975 ± 70	AA-12487	± 5770
MAUR 4 IV	*Pinus cembra*	74,2	1	3885 ± 70	AA-12486	± 4350
MAUR 6 IV	*Pinus* type *sylvestris*	12,1	1	4980± 85	AA-14775	± 5770
MAUR 6 VI	*Abies alba*	7,9	1	5590 ± 65	AA-14776	± 6390
QUEYRAS 2 I	*Pinus cembra*	1,4	1	1535 ± 45	AA-14790	± 1420
QUEYRAS 2 IV	*Pinus cembra*	1,1	1	1475 ± 70	AA-14791	± 1390

* AA = NSF Arizona AMS Laboratory, Tucson Arizona, USA.

** Dates calibrées d'après les tables de conversion de Pearson *et al.* (1986)

± 70 BP) dans le niveau II, mesure effectuée sur trois petits fragments, et ± 4350 cal. BP (3885 ± 70 BP) dans le niveau IV. Au regard de ces deux dates, il apparaît une inversion de la stratigraphie chronologique attendue d'après la différentiation taxonomique des trois phases d'incendies.

MAUR 6 (hypothèse n° 3)

Ce sondage a été prélevé à 1770 m d'altitude en limite supérieure de l'étage montagnard. Le prébois est actuellement constitué de jeunes *Picea abies*, *Pinus uncinata* et de *Sorbus aria* dans une prairie également colonisée par quelques arbustes. Le profil pédologique révèle un sol brun acide (USA : *typic dystrochrept*) à tendance colluviale et profond de 120 cm. Six niveaux ont été réalisés (fig. 5).

L'anthracomasse spécifique des niveaux augmente considérablement du bas vers le haut du profil (fig. 5). Trois espèces structurent quantitativement ce profil : *Abies alba*, *Pinus cembra* et *Pinus* section *sylvestris*. Les maxima d'AST de ces trois taxons ne sont pas localisés dans les mêmes niveaux. Celui d'*Abies alba* se situe en profondeur (niveau V) et dans les deux niveaux de surface, l'AST est nulle. Le pic d'AST de *Pinus* section *sylvestris* est clairement exprimé en surface (niveaux II et I). Celui de *Pinus cembra* a une position intermédiaire dans le niveau IV ; son AST présente une valeur plus faible que celle de *P.* section *sylvestris* mais supérieure à celle d'*Abies alba*.

Les assemblages des niveaux de fond sont constitués, outre des mêmes trois taxons dominants, d'*Acer*

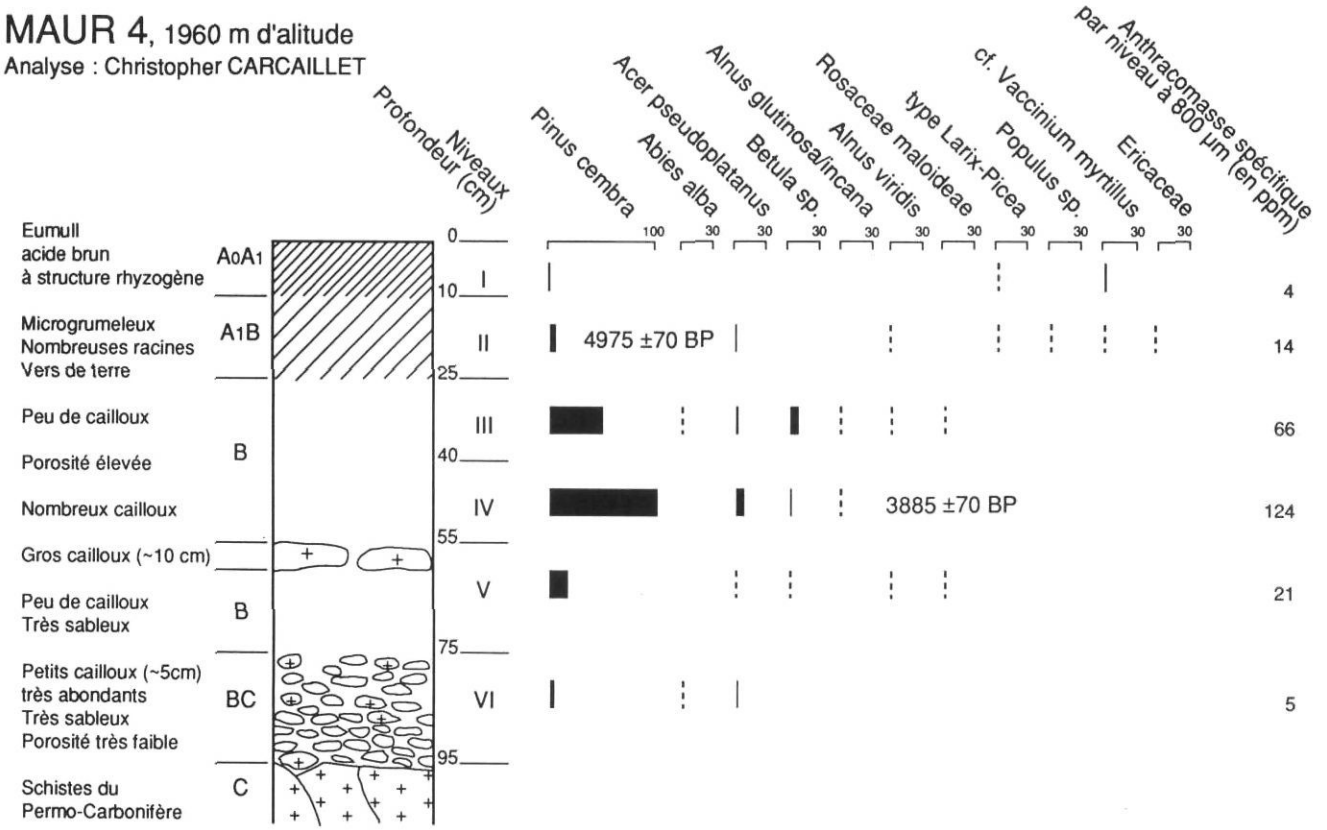

FIGURE 4. Profil pédoanthracologique de MAUR 4, à 1960 m d'altitude, bassin versant de Saint-Michel-de-Maurienne (45°15'N, 6°30'E), vallée de la Maurienne, Alpes françaises du nord. Les histogrammes représentent les AST (valeur en ppm). Les AST inférieures à 1 ppm sont illustrées par des pointillés. La végétation est une pelouse à *Festuca rubra*, *Alchemilla alpina*, *Carex sempervirens*, *Capsella bursa-pastoris*,... La pente d'environ 10° est exposée au sud-ouest.

Pedoanthracological profile of MAUR 4, at 1960 m a.s.l., Maurienne valley, north French Alps. The black bar thickness is proportional to the SAT in ppm. The dotted line represents a SAT < 1 ppm. The present day vegetation is a meadow of Festuca rubra, Alchemilla alpina, Carex sempervirens, Capsella bursa-pastoris. *The 10° slope is exposed to the south-west.*

pseudoplatanus, d'*Acer* cf. *platanoides*, de *Betula* sp., de *Sambucus racemosa* et de Rosaceae maloideae. Les niveaux IV et III se caractérisent par la présence de *Juniperus* sp., *Salix* sp. et *Populus* sp. d'une part, et par l'augmentation de l'AST de *Pinus* section *sylvestris*, d'*Acer pseudoplatanus* et d'*Acer* cf. *platanoides* d'autre part. Enfin, en surface (niveau II et I), les assemblages sont structurés autour de *Pinus* section *sylvestris* dont l'AST est très élevée, accompagné d'*Alnus viridis*, d'Ericaceae et d'une Fabaceae (cf. *Ononis*).

Ce profil a été daté selon l'hypothèse n° 3. Deux dates sont disponibles (tabl. II) : ± 5770 cal. BP (4980 ± 85 BP) pour un fragment de *P.* type *sylvestris* du niveau MAUR 6 IV et ± 6390 BP cal. (5590 ± 65 BP) pour un fragment d'*Abies alba* du niveau MAUR 6 VI. Elles ont été mesurées sur des fragments de plus de 2 mm de diamètre. Ces deux dates soutiennent l'hypothèse de départ, à savoir qu'il existe une stratigraphie perturbée.

DISCUSSION

En dépit des datations contredisant l'existence d'une stratigraphie vieillissante du haut vers le bas dans les sols, le profil MAUR 4 (fig. 4) met en lumière trois phases d'incendies, sur la base d'une interprétation qualitative et quantitative des assemblages. De même MAUR 1 (fig. 3) peut être divisé en deux parties. Enfin dans MAUR 6 (fig. 5), nous distinguons nettement trois assemblages. Alors que QUEYRAS 2 ne fait apparaître aucune stratigraphie, l'analyse qualitative et quantitative approfondie des assemblages de MAUR 1, 4 et 6 révèle une certaine organisation verticale de la répartition des charbons. Cette organisation n'est probablement pas le résultat d'un effet stochastique comme le soutiennent Hopkins *et al.* (1993). Cette contradiction apparente amène à évoquer les processus qui contribuent à l'enfouissement, au brassage et à la fragmentation des charbons dans les sols de montagne.

1. ENFOUISSEMENT ET BRASSAGE DES CHARBONS DANS LES SOLS

a) Agents biotiques

Les vers de terre anéciques enfouissent et brassent les éléments fins dans les sols de montagne, jusqu'à 1600-2000 m d'altitude (J. Galissian, comm. pers.), voire plus haut dans l'étage alpin, si les conditions climatiques sont favorables (Cuendet, 1986). En remontant à la surface, sous forme

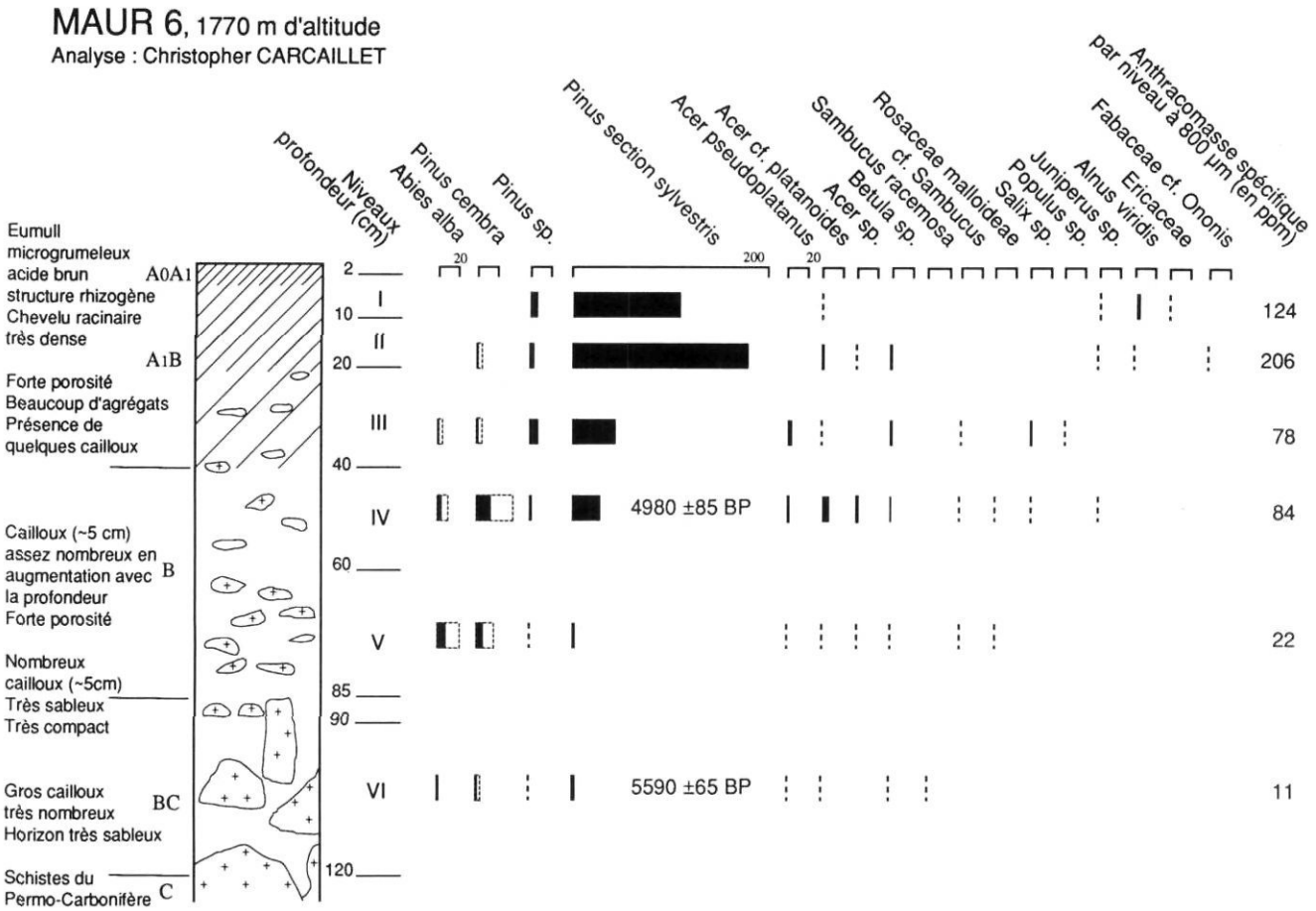

FIGURE 5. Profil pédoanthracologique de MAUR 6, à 1770 m d'altitude, bassin versant de Saint-Michel-de-Maurienne (45°15'N, 6°30'E), vallée de la Maurienne, Alpes françaises du nord. Les histogrammes représentent les AST (valeur en ppm). Les histogrammes en blanc de *Pinus cembra* et *Abies alba* représentent les AST ×2,5. Les AST inférieures à 1 ppm sont illustrées par des pointillés. La végétation est un prébois de *Picea abies*, *Pinus uncinata*, *Sorbus aria*, *Juniperus communis*, *Rosa canina* et *Cotoneaster integerima*. La pente d'environ 20-25° est exposée au sud-ouest.

Pedoanthracological profile of MAUR 6, at 1770 m a.s.l., Maurienne valley, north French Alps. The black bar thickness is proportional to the SAT in ppm. The white bar thickness of Pinus cembra *and* Abies alba *indicate the SAT ×2.5. The dotted line represents a SAT < 1 ppm. The present day vegetation is a old-field colonized by* Picea abies, Pinus uncinata, Sorbus aria, Juniperus communis, Rosa canina *and* Cotoneaster integerima. *The 20-25° slope is exposed to the south-west.*

de turricules, les éléments fins ingérés lors du creusement de leurs galeries verticales, ils remontent aussi des sables grossiers dont les dimensions correspondent à celles des charbons étudiés (ø > 400 μm) ; des particules minérales de 2,5 mm de diamètre ont même été observées dans le tube digestif des vers anéciques d'une pessière de l'étage montagnard de la forêt de Mâcon dans la vallée de la Tarentaise en Savoie (J.-F. Ponge, comm. pers.). Ainsi, les vers anéciques (i) contribuent à enfouir de manière passive, vers les horizons profonds des sols de montagne jusqu'à une altitude d'environ 2000 m, les objets déposés dans et sur la litière, et (ii) font subir aux matières organiques, dont les charbons de bois, une remontée à la surface du sol.

D'autres animaux, invertébrés [coléoptères fouisseurs coprobies (Scarabæoïdae)] ou vertébrés (marmotte, sanglier), contribuent également à ces phénomènes d'enfouissement et de brassage des charbons. En creusant le sol à des profondeurs plus ou moins grandes, ils remontent en surface une certaine quantité de terre qui recouvre les horizons supérieurs contenant des charbons d'âge récent. Comme cette terre est elle-même susceptible de contenir des charbons anciens venus des horizons profonds, il y aura contamination des horizons de surface.

b) Agents abiotiques

Lorsque les arbres tombent lors de chablis, il se déracinent et les horizons du sol se mélangent en perturbant l'éventuelle stratification du sol (Bormann *et al.*, 1995). Sur les fortes pentes, l'enfouissement peut être provoqué par solifluxion ou colluvionnement. La cryoturbation est également susceptible de jouer un rôle comme facteur d'enfouissement des charbons.

L'eau, composante mobile du sol, peut-elle participer à l'enfouissement et au brassage des charbons ? La taille des fragments que nous identifions est supérieure à 400 μm de diamètre. Or, les sols ne présentent pas de pores de ce diamètre en continuité de la surface vers la profondeur (Duchaufour et Souchier, 1979) pouvant contribuer à la descente des char-

bons dans un profil, excepté dans des sols strictement sableux ou graveleux. L'eau ne joue donc pas de rôle quant au mouvement des charbons dans les sols de montagne.

Les charbons de différentes végétations peuvent-il provenir d'un apport allochtone de matériel et contribuer ainsi à un brassage que l'on qualifie d'horizontal ? Clark (1988) et Thinon (1992) ont démontré que les charbons de plus de 100 μm de diamètre ne peuvent pas être mis en suspension dans la colonne thermique et le panache de fumée au dessus des flammes. Seul le transport saltatoire par le vent est rendu possible lorsque les conditions suivantes sont réunies : vents forts, absence de végétation, climat sec (Clark, 1988 ; Thinon, 1992). Cette démonstration est soutenue expérimentalement (Wein *et al.*, 1987). La dimension des charbons faisant l'objet des identifications ne permet pas leur transport à plus de quelques centaines de mètres de l'incendie.

2. FRAGMENTATION DES CHARBONS DANS LES SOLS

Des facteurs biotiques et abiotiques sont responsables de la fragmentation des charbons dans les sols. Rendus nutritivement attractifs pour les végétaux en raison de leur fort pouvoir adsorbant vis-à-vis des composés humiques et ioniques du sol, les charbons sont piégés, traversés et fragmentés par les racines et les radicelles. Les vers de terre les ingèrent en même temps que les fines particules du sol dont ils se nourrissent et les broient lors du transit dans leur tube digestif (Bouché, 1981). Les phénomènes de gel-dégel jouent également un rôle très important en montagne dans la fragmentation des charbons. Le gel exerce une grande puissance destructive (gélifraction) car l'eau gelant dans les fissures des roches exerce une pression de 14 kg/ cm^2 (Bellair et Pomerol, 1984). Chaque année, un fragment de charbon de bois enfoui dans un sol de montagne est susceptible de se fragmenter au moins une fois, et cette probabilité augmente avec le temps et l'altitude. Enfin, la pression exercée par la colonne de terre sur le charbon contribue elle aussi à le fragiliser et le fragmenter.

Malgré l'absence d'études expérimentales, il est raisonnable d'envisager une relation étroite entre le taux de fragmentation et le couple temps-altitude. L'abondance du réseau racinaire des pelouses alpines et la grande fréquence des cycles de gel-dégel accélèrent le processus de fragmentation des charbons des sols de haute altitude par rapport à ceux situés plus bas dans les étages forestiers. La taille moyenne des fragments des assemblages les plus anciens serait inférieure à celle des assemblages les plus récents. Donc, plus l'incendie est ancien, moins la probabilité de recueillir des fragments sur un tamis de 400 μm est grande. Si les agents de fragmentation parviennent à réduire tous les fragments à une taille inférieure à 400 μm, le niveau s'avère « improductif ».

3. CONSÉQUENCE DE L'ENFOUISSEMENT, DU BRASSAGE ET DE LA FRAGMENTATION

Avec le temps, les charbons déposés sur le sol après un incendie sont enfouis, brassés et fragmentés. Ces processus ont une incidence sur l'interprétation des diagrammes, puisqu'ils s'opposent à une stratification. Dans la figure 6, nous tentons d'illustrer le scénario hypothétique décrivant l'enfouissement et le brassage d'une certaine quantité de charbons depuis la surface (dépôt post-incendie, T_0) vers la profondeur (T_{+n}). Plusieurs millénaires sont nécessaires pour répartir les charbons d'un incendie dans le sol comme à T_{+n}. D'après le scénario de la figure 6, on comprend pourquoi des charbons d'assemblages de surface ne sont pas forcément plus récents que ceux situés en profondeur. Il est donc nécessaire de différencier charbons et assemblages : si les charbons du même assemblage peuvent appartenir à plusieurs phases d'incendie, en revanche deux assemblages peuvent révéler des différences provenant de deux types de végétation brûlée.

4. INTERPRÉTATION FONCTIONNELLE DE LA STRATIFICATION

Après ces mises au point d'ordre taphonomique, nous proposons un scénario expliquant le profil quantitatif d'un sol de moyenne altitude (fig. 7). Considérons pour un même sol trois phases d'incendie successives produisant trois populations de charbons P1, P2 et P3 équivalentes en masse et s'enfouissant selon le scénario d'une stratigraphie en écaille (fig. 7). Nous obtenons les profils quantitatifs des trois populations T_{+1} pour P1, T_{+2} pour P2 et T_{+3} pour P3. L'incendie le plus ancien (T_{+3}) se retrouve en profondeur ; une partie des charbons de P3 a subi une remontée vers la surface en raison de la bioturbation. P2 se situe vers le milieu du profil. Son anthracomasse, identique à celle de P3, est déjà en partie brassée, mais moins que pour P3. Enfin, le stock de charbons P1 de l'incendie le plus récent est localisé en surface ; il est à peine enfoui et brassé. Le profil cumulé des trois populations au temps T_{+3} correspond à : Σ = P1+P2+P3.

Ce scénario d'une stratification en écaille des charbons dans un profil peut être appliqué à la distribution de *Pinus* section *sylvestris* dans MAUR 6 (fig. 5), qui montre une certaine similitude avec le profil Σ = P1+P2+P3 (fig. 7). En outre, *Abies alba* et *Pinus cembra* présentent un pic quantitatif se situant dans le niveau IV pour *Pinus cembra* et dans le niveau V pour *Abies alba*. En s'appuyant sur les scénarios des figures 6 et 7, le pic d'*Abies alba* s'explique par la

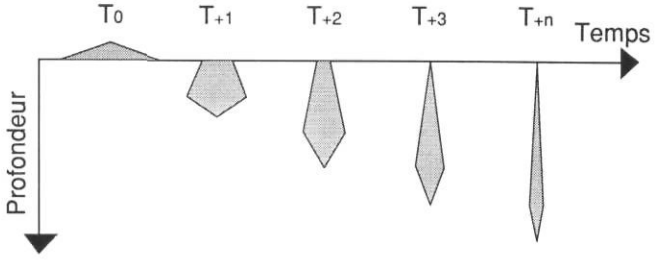

FIGURE 6. Profil quantitatif de descente relative des charbons d'un incendie donné dans un sol en fonction du temps (hypothèse). T_0 correspond à l'accumulation des fragments de charbon de bois après l'incendie. On considère dans cette hypothèse que la masse totale de charbons est invariable en fonction du temps.

Quantitative profile of relative down movement of wood charcoal/time (hypothesis). T_0 = wood charcoal deposition immediatly after fire. In the present hypothesis, charcoal total mass is considered to be unvariable with time.

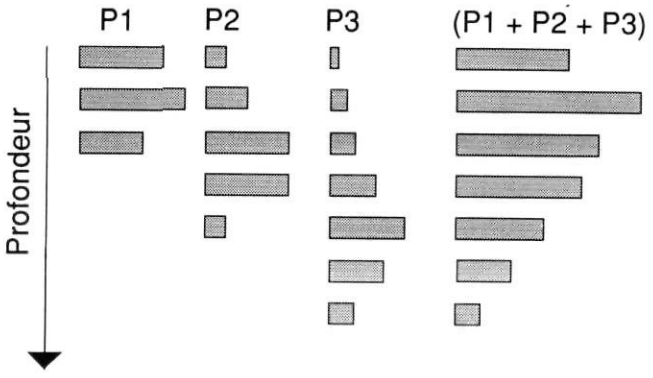

FIGURE 7. Profils quantitatifs des charbons de bois provenant de trois phases d'incendies : P1, P2, P3. La courbe cumulée correspond à (P1, P2, P3). Cette distribution est obtenue sous l'effet de la bioturbation exercée par les vers de terre et les arthropodes fouisseurs sur les particules fines du sol. Cette représentation n'intègre pas le taux de fragmentation des charbons dans les sols en fonction du temps, sous l'effet de la cryofraction, de la biofragmentation et de la pression exercée par la colonne de sol, ce qui aurait pour effet de diminuer la quantité totale de charbons extraits dans les plus vieux assemblages pour une maille de tamis donnée.

Wood charcoal quantitative profiles for three different fire phases P1, P2, P3. The cumulative curve consist of P1, P2, P3. This distribution is due to the effect of earthworm and arthropod bioturbation on small soil particle. This interpretation does not take into account the charcoal fragmentation in the soil due to cryoturbation, biofragmentation and soil columm pressure. These processes would result in the reduction of total charcoal amount extracted from the oldest assemblages with same sieving diameter.

distribution de P3, et *Pinus cembra* par celle de P2. Les charbons d'*Abies alba*, principalement situés en profondeur, seraient par conséquent plus anciens que ceux de *Pinus cembra*. Étant plus anciens, les charbons d'*Abies alba* ont subi une fragmentation plus importante, se traduisant dans les valeurs du tableau I, et donnant naissance à une majorité de fragments de diamètre inférieur à la maille du tamis utilisé. Ceci expliquerait les différences quantitatives constatées avec *Pinus cembra* et surtout avec *P.* section *sylvestris*.

L'hyper fragmentation subie par les charbons sous l'effet de l'alternance gel-dégel et du réseau racinaire des pelouses alpines est probablement la cause de la faible anthracomasse de QUEYRAS 2. Quant à MAUR 1 et MAUR 4, ils représentent des stades intermédiaires entre la stratification en écaille de MAUR 6 et la situation extrême de QUEYRAS 2.

5. SIGNIFICATION PÉDOANTHRACOLOGIQUE DES DATATIONS

Considérant (i) les remontées de petits fragments de charbons de bois et (ii) le rôle de piège à charbons que représente le réseau racinaire des sols sous pelouse, les datations au ^{14}C de MAUR 1 et MAUR 4 ne sont plus du tout incompatibles avec une probable stratigraphie des charbons dans les sols. La date obtenue pour le niveau IV, ± 4350 cal. BP peut donc être considérée, au regard de la taille du fragment daté, comme celle de la seconde phase d'incendie, celle des niveaux V, IV et III. Il est en effet peu probable que ce gros fragment ait pu être remonté des niveaux inférieurs. En revanche, la date obtenue pour le niveau II, curieusement plus ancienne que celle du niveau IV, est une mesure provenant de trois petits fragments de charbons probablement remontés par bioturbation. Cette date, moyenne par définition, ne s'applique pas à la dernière phase d'incendie du niveau II. Les mêmes remarques sont applicables à MAUR 1 où l'on peut identifier deux phases d'incendie au travers de l'analyse quantitative et qualitative des assemblages. La date de ± 4100 cal. BP est admissible pour dater l'assemblage MAUR 1 III ; la date ± 3700 cal. BP provenant d'une mesure sur plusieurs petits fragments est trop ancienne pour les assemblages de surface.

Les dates de MAUR 1 (± 3700 et ± 4100 cal. BP) sont espacées d'environ 400 ans alors que celles de MAUR 4 (± 4350 et ± 5770 cal. BP) le sont d'environ 1400 ans. Mais l'incendie n'est pas forcément contemporain de la fabrication du ou des cernes de croissance sur lesquels la date a été effectuée. L'incendie peut brûler des arbres âgés de plusieurs dizaines ou centaines d'années ou bien carboniser du bois mort depuis longtemps. En effet, des arbres ou des souches millénaires ont été observés dans les Alpes (Serre-Bachet, 1978 ; Tessier, 1986). La date mesurée sur un fragment n'est probablement pas l'année de l'incendie. Un décalage de 800 ans ou 1000 ans entre l'âge de deux fragments de charbons n'est pas exceptionnel. Les charbons datés dans MAUR 1 peuvent provenir d'un seul incendie survenu vers 3700 cal. BP, tandis que la différence de 1400 ans constatée entre les deux dates calibrées de MAUR 4 suppose plutôt deux phases d'incendies de pins cembro survenue à la même station. Les dates de QUEYRAS 2 appartiennent à l'évidence à un même peuplement daté de ± 1400 BP. Les datations de MAUR 6 ont été effectuées sur de gros fragments (tabl. II), pour éviter les mélanges par remontée biologique, et sur des taxons caractérisant le mieux le niveau du point de vue de l'évolution de la végétation. Les dates confortent l'hypothèse d'une stratigraphie en écaille, identifiée au préalable par une analyse mixte qualitative et quantitative. La phase d'incendie des sapins est donc datée d'environ 5500-6000 ans et la phase d'incendie des pins cembro d'environ 4500-5000 ans.

CONCLUSION

La stratigraphie dans un sol de montagne résulte de processus ne supportant pas la comparaison avec la stratigraphie des tourbes ou celle des sédiments lacustres. Les sols de haute altitude ne semblent pas pouvoir révéler les diverses phases de l'évolution de la végétation. Mais à plus basse altitude, lorsque les contraintes mécaniques sont moindres et les phases d'incendies plus fréquentes, l'analyse à la fois qualitative et quantitative des assemblages anthracologiques est possible. Cette démarche analytique et le secours de dates au ^{14}C permettent de mieux comprendre le mode de stratification des charbons en vue de reconstituer la dynamique de la végétation ligneuse de la station. Nos résultats montrent que la stratification dans les sols n'est pas parfaite. Le temps est à l'évidence l'une des composante de la répartition en profondeur des charbons pédologiques (Berli *et al.*, 1994 ; Vernet *et al.*, 1994 ; Boulet *et al.*, 1995). Mais notre travail permet de corriger cette conception et rappelle l'importance des brassages dont le sol fait l'objet. Les

assemblages les plus anciens peuvent ne pas être recueillis par notre méthode si la fragmentation a réduit tous les charbons à une taille inférieure à 400 μm. Le matériel à dater doit être choisi à partir de l'interprétation quantitative et qualitative du diagramme de charbons de bois qui révèle une stratigraphie perturbée dite « en écailles ».

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Dr Michel Thinon et le Pr Marcel Barbero pour les conditions de travail très favorables dont nous avons profité au Laboratoire de Botanique et d'Écologie de l'Institut méditerranéen d'Écologie et de Paléoécologie, à l'Université d'Aix-Marseille III. Nous exprimons particulièrement notre sincère gratitude aux Dr J. Gallissian (Université d'Aix-Marseille I), J.-F. Ponge (MNHN, Paris) et M. B. Bouché (INRA-CNRS, Montpellier) pour les conversations fructueuses que nous avons partagées en matière de biologie du sol. Nos remerciements sont adressés aux Pr P. J. H. Richard, J.-L. Vernet et à un lecteur anonyme pour les remarques pertinentes faites sur le manuscrit. Les datations ont été financées par le Ministère de l'Environnement (France) sur les programmes « Dynamique des formations ligneuses post-culturales dans les Alpes du nord au niveau des lisières d'altitude », « Histoire, évolution et dynamique des limites supra-forestières en relation avec les changements climatiques et l'action de l'homme » et « Évolution de la biodiversité dans la vallée de la Maurienne ». Les mesures au ^{14}C ont été réalisées à la NSF Arizona AMS Laboratory (USA). Enfin ce travail est une contribution aux thèses de doctorat en Sciences des deux auteurs.

RÉFÉRENCES

Albert, D. A. et Minc, L. D., 1987. The natural ecology and cultural history of the Colonial Point red oak stands. University of Michigan Biological Station, Technical Report n° 14, 61 p.

Bellair et Pomerol, 1984. Éléments de géologie. Armand Colin, Paris, 495 p.

Berli, S., Cherubini, P. et Schoch, W., 1994. Rekonstruktion von Bestandesfluktuationen, Bodenmächtigkeit und Feuergeschichte über 7 000 Jahre BP mittels Holzkohle-Analysen. Botanica Helvetica, 104 : 17-30.

Bormann, B. T., Spaltenstein, H., McClellan, M. H., Ugolini, F. C., Cromack, K. Jr. et Nay, S. M., 1995. Rapid soil development after windthrow disturbance in pristine forests. Journal of Ecology, 83 : 747-757.

Bouché, M. B., 1981. Contribution des lombriciens aux migrations d'éléments dans les sols tempérés. Colloques internationaux C.N.R.S. 303 Migrations organo-minérales dans les sols tempérés, édition C.N.R.S. : 145-153.

Boulet, R., Pessenda, L. C. R., Telles, E. C. C. et Melfi, A. J., 1995. Une évaluation de la vitesse de l'accumulation superficielle de matière par la faune du sol à partir de la datation des charbons de bois et de l'humine du sol. Exemple des latosols des versants du lac Campestre, Salitre, Minas Gerais, Brésil. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 320, Série IIa : 287-294.

Bryson, R. A., Irving, W. N. et Larsen, J. A., 1965. Radiocarbon and soil evidence of former forest in the southern Canadian tundra. Science, 147 : 46-48.

Carcaillet, C. et Thinon, M., 1996. Pedoanthracological contribution to the evolution of the upper treeline in the Maurienne Valley (North French Alps) : Methodology and preliminary data. Review of Palaeobotany and Palynology, 9 : 399-416.

Clark, J. S. 1988. Particle motion and the theory of charcoal analysis : Source area, transport, deposition, and sampling. Quaternary Research, 30 : 67-80.

Cuendet, G., 1986. Le peuplement lombricien d'une pelouse alpine à Bossetan (frontière franco-suisse, Valais) et répartition des lombriciens en altitude. Bulletin de la Société vaudoise de Sciences naturelles, 78(2) : 133-144.

Di Pasquale, G., 1994. L'apporto dell'analisi pedoantracologica allo studio dell'ecologia del paesaggio mediterraneo : due esempi. Dottorato di ricerca in ecologia forestale, Università Degli Studi di Padova, 155 p.

Duchaufour, P., Faivre, P. et Gury, M., 1976. Atlas écologique des sols du monde. Masson, Paris, 178 p.

Duchaufour, P. et Souchier, B., 1979. Pédologie, T 2 Constituants et propriétés du sol. Masson, Paris, 477 p.

Greguss, P., 1955. Identification of living Gymnosperms on the basis of xylotomy. Akadémiai Kiado, Budapest, 263 p.

——— 1959. Holzanatomie der europaïschen Laubhölzer und Sträucher. Akadémiai Kiado, Budapest, 303 p.

Hopkins, M. S., Ash, J., Graham, A. W., Head, J. et Hewett, R. K., 1993. Charcoal evidence of the spatial extent of the Eucalyptus woodland expansions and rainforest contractions in North Queensland during the late Pleistocene. Journal of Biogeography, 20 : 357-372.

Jacquiot, C., 1955. Atlas d'anatomie des bois de conifères. Centre technique du bois, Paris, 2 tomes, 133 p.

Jacquiot, C, Robin, A.-M. et Bedeneau, M., 1973a. Reconstitution d'un ancien peuplement forestier en forêt de Fontainebleau par l'étude anatomique de charbons de bois et leur datation par le ^{14}C. Bulletin de la Société botanique de France, 120 : 231-234.

Jacquiot, C., Trenard, Y. et Dirol, D., 1973b. Atlas d'anatomie des bois des Angiospermes (essences feuillues). Centre technique du bois, Paris, 2 tomes, 175 p.

Payette, S. et Filion, L., 1993. Origin and significance of subarctic patchy podzolic soils and paleosols. Arctic and Alpine Research, 25(4) : 267-276.

Payette, S. et Gagnon, R., 1985. Late Holocene deforestation and tree regeneration in the forest-tundra of Québec. Nature, 313 : 570-572.

Pearson, G. W., Pilcher J. R., Baillie, M. G. L., Corbett, D. M. et Qua, F., 1986. High-Precision ^{14}C measurement of Irish Oaks to show the natural ^{14}C variations from AD 1840-5210 BC. Radiocarbon, 28(2B) : 911-934.

Schweingruber, F. H., 1978. Mikroscopische Holzanatomie - Anatomie microscopique du bois - Microscopical wood anatomy. Institut fédéral recherches forestières Birmensdorf. Zürcher AG, Zug, 226 p.

Schweingruber, F. H., 1990. Anatomie europaïscher Hölzer - Anatomy of European woods. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf. Haupt, Bern und Stuttgart, 800 p.

Serre-Bachet, F., 1978. The dendroclimatological value of the European Larch (*Larix decidua* Mill.) in the French Maritime Alps. Tree-ring Bulletin, 38 : 25-34.

Sorenson, C. J., Knox, J. C., Larsen, J. A. et Bryson, R. A., 1971. Paleosols and the forest border in Keewatin, N.W.T.. Quaternary Research, 1 : 468-473.

Tessier, L., 1986. Chronologie de mélèzes des Alpes et petit âge glaciaire. Dendrochronologia, 4 : 97-113.

Tessier, L., de Beaulieu, J.-L., Coûteaux, M., Edouard, J.-L., Ponel, P., Rolando, C., Thinon, M., Thomas, A. et Tobolski, K., 1993. Holocene palaeoenvironment at the timberline in the Alps (Taillefer Massif, French Alps) : A multidisciplinary approach. Boreas, 22 : 244-254.

Thinon, M., 1978. La pédoanthracologie : une nouvelle méthode d'analyse phytochronologique depuis le Néolithique. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris, 287, série D : 1203-1206.

——— 1992. L'analyse pédoanthracologique, aspects méthodologiques et applications. Thèse ès Sciences, Université d'Aix-Marseille III, 317 p.

Tutin, T. G., Heywood, V. H., Burges, N. A., Valentine, D. H., Walters, S. M. et Webb, D. A. 1964-1980. *Flora Europaea*, vol. 1-5. Cambridge University Press.

Vernet, J.-L., Wengler, L., Solari, M.-E., Ceccanti, G., Fournier, M., Ledru, M.-P. et Soubiès, F., 1994. Feux, climats et végétations au Brésil central durant l'Holocène : les données d'un profil de sol à charbons de bois (Salitre, Minas Gerais). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 319, série II : 1391-1397.

Wein, R. W., Burzinski, M. P., Sreenivasa, B. A. et Tolonen, K. 1987. Bog profile evidence of fire and vegetation dynamics since 3000 years BP in the Acadian forest. Canadian Journal of Botany., 65 : 1180-1186.