CENTRE D'ÉTUDES PRÉHISTOIRE, ANTIQUITÉ, MOYEN ÂGE - UMR 6130
Actes de la table ronde, 27-29 mai 2008

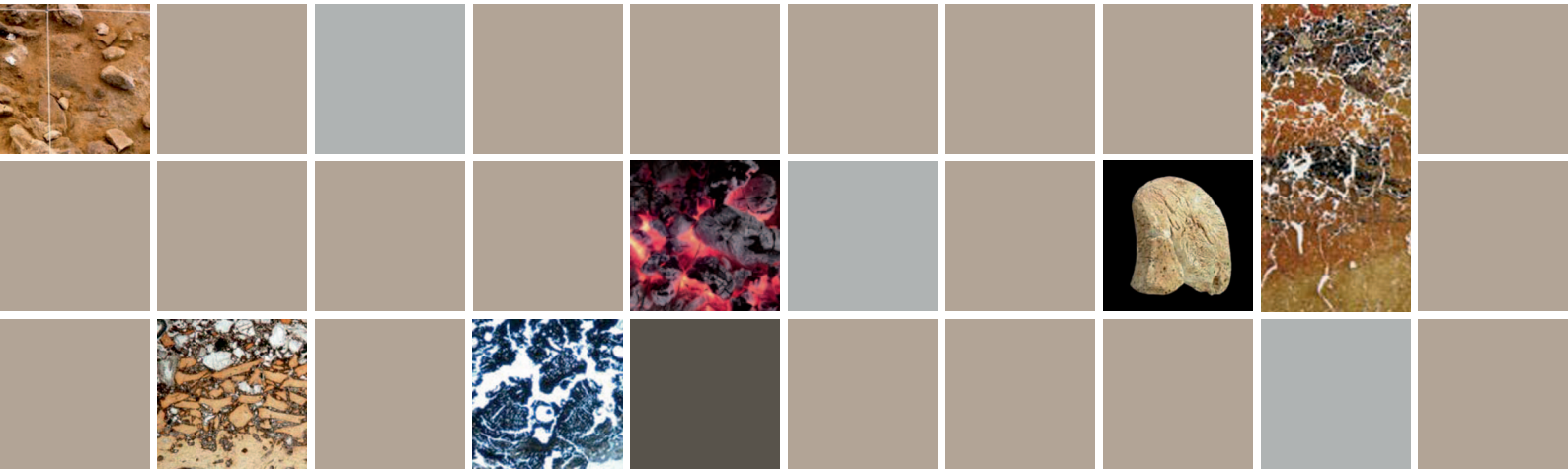
2010 # 2

http://www.palethnologie.org
ISSN 2108-6532

sous la direction de

Isabelle THÉRY-PARISOT
Lucie CHABAL
Sandrine COSTAMAGNO

TAPHONOMIE DE LA COMBUSTION DES RÉSIDUS ORGANIQUES ET DES STRUCTURES DE COMBUSTION EN CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE



P@LETHNOLOGIE
Revue bilingue de Préhistoire

P@LETHNOLOGIE
Revue bilingue de Préhistoire

Revue publiée par l'association P@lethnologie, créée et soutenue par le laboratoire TRACES, le laboratoire Ethnologie préhistorique, l'université de Liège, le ministère de la Culture et de la Communication.

Directrice

Vanessa LEA

Comité éditorial

François BON
Sandrine COSTAMAGNO
Karim GERNIGON
Vanessa LEA
Monique OLIVE
Marcel OTTE
Michel VAGINAY
Nicolas VALDEYRON

Comité scientifique

Michel BARBAZA, université de Toulouse, France
Laurent BRUXELLES, INRAP, France
Jacques CHABOT, université de Laval, Canada
Jesús GONZÁLEZ URQUIJO, université de Cantabrie, Espagne
Dominique HENRY-GAMBIER, CNRS, France
Jacques JAUBERT, université de Bordeaux, France
Béatrix MIDANT-REYNES, CNRS, France
Karim SADR, université de Witwatersrand, Afrique du Sud
Boris VALENTIN, université Paris I, France
Jean VAQUER, CNRS, France
Randall WHITE, université de New York, États-Unis

Traduction

Magen O'FARRELL

Maquette, mise en page

Yann BELIEZ

Couverture

Fabien TESSIER

Les contributions sont à adresser à :

REVUE P@LETHNOLOGIE
Vanessa LEA, chargée de recherche

TRACES - UMR 5608 du CNRS
Maison de la recherche
5 allées Antonio Machado
31058 Toulouse cedex 9, FRANCE

Téléphone : +33 (0)5 61 50 36 98
Télécopie : +33 (0)5 61 50 49 59
Courriel : vanessa.lea@univ-tlse2.fr

Cette manifestation et ses actes ont reçu le soutien de

TRACES
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère Culture Communication
Université de Toulouse
UNIVERSITE DE TOULOUSE LE MIRAIL
Université de Liège
RÉGION MIDI-PYRÉNÉES
cnrs dépasser les frontières
ARSCAN ETHNOLOGIE PRÉHISTORIQUE
MSH - NICE Maison des Sciences de l'Homme
Institut national de recherches archéologiques préventives Inrap
Centre Études Préhistoire Antiquité Moyen Âge

DU BOIS AUX CHARBONS DE BOIS : APPROCHE EXPÉRIMENTALE DE LA COMBUSTION

Isabelle THÉRY-PARISOT, Lucie CHABAL, Maria NTINOU, Laurent BOUBY & Alain CARRÉ

P@lethnologie / 2010.2
Revue bilingue de Préhistoire

Résumé

Quel que soit notre objet d'étude, l'environnement végétal *sensu stricto*, les pratiques anthropiques liées à l'usage du feu, ou les interactions entre l'homme et son environnement, la prise en compte des agents taphonomiques de distorsion des assemblages anthracologiques constitue une étape essentielle de la recherche.

Ces processus que nous appelons filtres ou agents sont de plusieurs natures : les pratiques anthropiques de la collecte et la gestion du foyer lui-même, la combustion, les processus dépositionnels et post-dépositionnels, enfin, le filtre de l'archéologue et de l'anthracologue qui, selon le mode opératoire d'échantillonnage et de quantification induit une distorsion de l'assemblage tel qu'il apparait lors de sa découverte.

Dans cet article, nous nous intéressons en détail à l'incidence de l'un de ces processus sur la représentation finale des essences mises au feu : la combustion.

Les résultats présentés ici proviennent de 110 combustions expérimentales standardisées, réalisées en conditions de laboratoire et l'étude quantitative de 295000 charbons de bois. Nous avons ainsi pu montrer (i) que le taux de résidus n'est pas dans une simple relation de proportionnalité avec la quantité de bois mis au feu, même moyennant des conditions de combustion standardisées ; (ii) qu'il existe un comportement au feu stationnel (intra- spécifique) aléatoire ; (iii) qu'il existe une variabilité spécifique qui discrimine trois groupes de taxons. Cette variabilité spécifique ne s'explique par aucune des variables testées (humidité, densité, proximité taxinomique, températures, durée de la combustion). Le travail expérimental met ainsi en exergue la difficulté à trouver une adéquation entre des variables, dont l'incidence semble *a priori* évidente, et le taux de charbons de bois résiduels.

Mots clés : expérimentation, carbonisation, fragmentation, charbons de bois, représentativité

Introduction

Les études anthracologiques menées sur des charbons de bois archéologiques reposent principalement sur l'interprétation paléoécologique ou économique de résidus issus d'une combustion incomplète du bois, recueillis dans les sédiments archéologiques ou les foyers. Si l'on en croit les durées d'occupation appréhendées, ces résidus représentent une très faible proportion de la masse de bois mise au feu, et sans doute une proportion variable selon les sites et les dépôts, c'est-à-dire selon les modes de gestion du combustible, d'entretien du feu, de vidange des foyers, de nettoyage des habitations, etc. Ne connaissant pas ces *habitus*, on ne sait rien du taux de disparition de matière entre le bois mis au feu et les résidus finalement recueillis. On ne peut ainsi pas accorder de signification aux quantités absolues des charbons de bois de chaque espèce. En particulier, la rareté des résidus ne signifie pas nécessairement la rareté du bois dans l'environnement. Peu de charbons de bois sont retrouvés à certaines périodes du Paléolithique en raison de forêts raréfiées ou d'alternances gel/dégel dans les dépôts, mais aussi durant l'Antiquité parce que les foyers et les sols sont balayés. C'est pourquoi l'anthracologue ne peut raisonner que sur la liste des taxons identifiés et leurs fréquences relatives dans un échantillon. Il est clair qu'il importe de savoir ce que peuvent représenter ces fréquences relatives.

Comme tout assemblage archéologique, les charbons de bois sont la résultante d'une succession d'évènements depuis l'environnement dont ils proviennent jusqu'au dépôt que nous étudions. La succession des processus taphonomiques qui les affectent peut être étudiée, afin de discuter du degré de transformation de l'information, que l'on s'intéresse aux milieux forestiers passés, aux pratiques sociétales liées au feu ou encore aux interactions entre l'économie du bois et les boisements (Chabal 1997 ; Théry-Parisot 2001 ; Théry-Parisot *et al*. sous presse). Mais dans cette succession de facteurs, il en est un, la combustion, qui mérite d'être analysé plus particulièrement, parce qu'il détermine une part majeure de la disparition du matériau bois. Doit-on alors considérer que la combustion agit comme un biais de représentativité des taxons et altère l'image de la végétation ou de toute autre réalité que nous voulons connaître ?

En anthracologie, le dénombrement des charbons de bois est l'unité de mesure des fréquences des taxons la plus couramment utilisée (Chabal 1982, 1988, 1992, 1997 ; Heinz 1990 ; Badal-Garcia 1992 ; Bourquin-Mignot *et al.* 1999). Cette méthode de quantification repose sur l'observation de l'existence d'un processus statistique de fragmentation, unique pour tous les taxons d'un échantillon archéologique. Ainsi, l'état de fragmentation observé dans un échantillon archéologique de charbons de bois, c'est-à-dire l'éventail des masses individuelles des fragments, est toujours très proche d'une loi de Poisson, dont les paramètres dépendent de la méthode de tamisage employée, mais pas du taxon considéré (Chabal 1989, 1992, 1997). Ceci permet d'affirmer que l'unité que constitue « un charbon de bois » a un sens au plan statistique, et permet de comparer les taxons entre eux, c'est-à-dire d'exprimer leurs fréquences relatives. Une question distincte, qui nous intéresse ici, est : les fréquences des taxons ainsi exprimées sont-elles une bonne expression de leurs fréquences dans le bois mis au feu ? En effet, la fragmentation et la réduction de masse sont deux processus simultanés, mais indépendants dans leurs résultats. Jusqu'à présent, l'anthracologie s'appuyait sur l'hypothèse selon laquelle toutes les essences ont un comportement moyen au feu identique au regard de la réduction de masse : c'est-à-dire que le rapport de proportionnalité entre la quantité de charbons de bois et la quantité de bois mise au feu serait identique pour toutes les espèces. Cette hypothèse repose (i) sur le constat d'une reproductibilité des spectres de fréquences entre niveaux synchrones d'un même site — ce qui ne serait pas le cas si la combustion déterminait une distorsion variable des fréquences des taxons et (ii) sur le constat de la représentativité paléoécologique des échantillons archéologiques de charbons de bois et de la cohérence entre eux et au cours du temps des diagrammes anthracologiques — ce qui ne serait pas le cas si la hiérarchie entre taxons dominants et taxons subordonnés était bouleversée par une réduction de masse différentielle.

L'existence d'une loi statistique unique de fragmentation pour tous les taxons justifiant notre unité de mesure est largement démontrée (puisqu'elle repose sur les échantillons archéologiques observés). À l'inverse, l'hypothèse selon laquelle toutes les essences ont un comportement moyen au feu identique rencontre encore des réticences

justifiées, puisqu'elle manque à ce jour de validation expérimentale. De fait, probablement en raison de la complexité de leur mise en œuvre, les travaux de quantification des fréquences des taxons au terme de combustions expérimentales sont peu nombreux et offrent des résultats parfois discordants, qu'il importe tout d'abord de rappeler.

A partir des années 1970-80, des expérimentations destinées à comprendre les processus de fragmentation et de réduction de masse du bois mis au feu ont été réalisées. Mais les résultats varient beaucoup selon les auteurs qui opposent généralement les variables intrinsèques et extrinsèques de la combustion comme facteurs déterminant le taux de résidus. Selon certains auteurs, le taux de résidus dépend des propriétés physiques, chimiques et mécaniques des espèces (Rossen & Olson, 1985 ; Smart & Hoffman, 1988 ; Loreau 1994 ; Braadbaart & Poole, 2008) alors que d'autres défendent l'incidence prépondérante de variables extrinsèques (type de structure, températures, oxygénation) (Scott & Jones 1991 ; Belcher *et al.* 2005 ; Vaughan & Nichols 1995). Selon Rossen et Olson (1985) les bois peu denses produisent moins de charbons que les bois durs, selon Loreau (1994) c'est le contraire. D'après ce même auteur, un taux d'humidité élevé du bois réduit sensiblement le taux de résidus alors que nos résultats tendent à minimiser l'effet de ce paramètre (Théry-Parisot *et al*., 2009). Pour certains auteurs, le calibre du bois détermine le taux de résidus (Smart & Hoffman, 1988). Lingens *et al.* (2005) suggèrent quant à eux que les différences du taux de restes sont plus liées à la composition chimique du bois qu'à sa densité. Les travaux de Belcher *et al.* (2005), de Scott et Jones (1991) voient dans le taux de résidus un effet concomitant de la température de combustion et de l'oxygénation. Enfin, selon Vaughan et Nichols (1995), la température atteinte dans le foyer conditionne la taille, la densité et la morphologie des résidus.

Face à la divergence des résultats et dans le cadre d'une réflexion plus large sur la taphonomie, il nous a paru nécessaire de poursuivre et de développer le travail analytique sur la combustion.

- Les essences ont-elles un comportement différentiel au feu ?
- Existe-t-il une sur ou une sous-représentation de certains taxons au terme de la combustion ?
- Quelles sont les variables de l'expérimentation qui déterminent le comportement au feu ?
- Peut-on et doit-on définir des indices de correction de fréquence des taxons utilisables en anthracologie ?

L'expérimentation est la méthode la plus appropriée pour répondre à ce type de questions.

L'expérimentation : démarche et protocole

Les expériences ont été réalisées dans un foyer ouvert, en condition de laboratoire, afin de limiter l'incidence avérée des facteurs externes sur le déroulement de la combustion (vent, humidité atmosphérique, forme du foyer, etc.) (fig. 1). Bien entendu, l'aménagement du foyer, sa taille, la façon de l'alimenter ont une incidence directe sur le comportement thermique du foyer et par conséquent sur les résidus eux-mêmes. Mais il existe tant de combinaisons qu'il serait illusoire de penser que l'on soit capable de reproduire expérimentalement l'ensemble des situations passées. Ainsi, en annulant (dans la mesure du possible) toute variation des paramètres extrinsèques et en standardisant au maximum les expériences, il est possible d'étudier le processus de la combustion pour son impact sur les combustibles, et ce indépendamment du geste technique.

En connaissant les effets de la combustion, et en particulier le comportement au feu des espèces, il sera ensuite possible de discuter de la sur-représentation d'un taxon due à d'autres causes, telles que la forme du foyer, ou les pratiques et gestes liés à l'usage du feu. D'autant plus que ces aspects nous intéressent au plus haut point, et qu'il ne faut pas risquer de les interpréter à tort, il est bien évident que le processus de combustion doit être connu préalablement.

L'expérimentation (fig. 2) a porté sur l'étude de onze taxons couramment représentés dans les assemblages anthracologiques : *Quercus pubescens ; Betula pubescens ; Olea europaea ; Corylus avellana ; Carpinus betulus ; Ostrya carpinifolia ; Pinus pinaster ; Pinus halepensis ; Pinus sylvestris ; Populus alba ; Populus tremula.* Afin de prendre en compte

la variabilité stationnelle les lots proviennent, pour chaque taxon, de deux stations géographiquement distinctes (à l'exception de *Populus alba*, *Populus tremula*, *Carpinus betulus* et *Ostrya carpinifolia* pour lesquels une seule station a été échantillonnée). Le bois est non refendu, sec, présentant un taux d'humidité compris entre 12 et 14%. Les caractéristiques des lots sont préalablement enregistrées pour chaque bûche (masse, volume, surface, calibre, taux d'humidité).

Chaque combustion est réalisée selon un protocole strictement identique : le foyer composé de 6 bûches calibrées, est toujours aménagé et entretenu à l'identique (fig. 1). L'allumage est réalisé au chalumeau afin de ne pas introduire de petits calibres pour l'allumage.

Pour chaque taxon et chaque station, 6 répliques (parfois seulement 5) de combustion sont réalisées afin de contrôler et d'enregistrer la variabilité des expériences similaires, appelée « intra-individuelle ».

Dans une structure ouverte, la température est une mesure très fluctuante, conditionnée par la position du capteur dans le foyer et seul un nombre élevé de capteurs permet d'acquérir un bilan thermique exploitable. Les températures font l'objet d'enregistrements simultanés à l'aide de 12 capteurs répartis dans le foyer. Sont enregistrés également, la durée totale et la durée de combustion avec flammes.

Au terme de la combustion, l'ensemble des résidus est tamisé à 4 mailles déterminant 5 fractions (>4 mm, 2 à 4 mm, 1 à 2 mm, 0,5 à 1 mm, < 0,5 mm), pesé et dénombré (pour les classes >4 et 2 à 4 mm). Les cendres sont réservées pour l'étude quantitative des phytholithes (Delhon, ce volume).

Les résultats que nous présentons ici portent sur 110 combustions ce qui représente 295 688 charbons de bois résiduels. Dans cet article, nous présentons les résultats de l'étude des résidus de taille supérieure à 2 mm (tamis 2 et 4 mm).

Fig. 1 - Structure de combustions expérimentales : du bois aux charbons de bois.

www.palethnologie.org

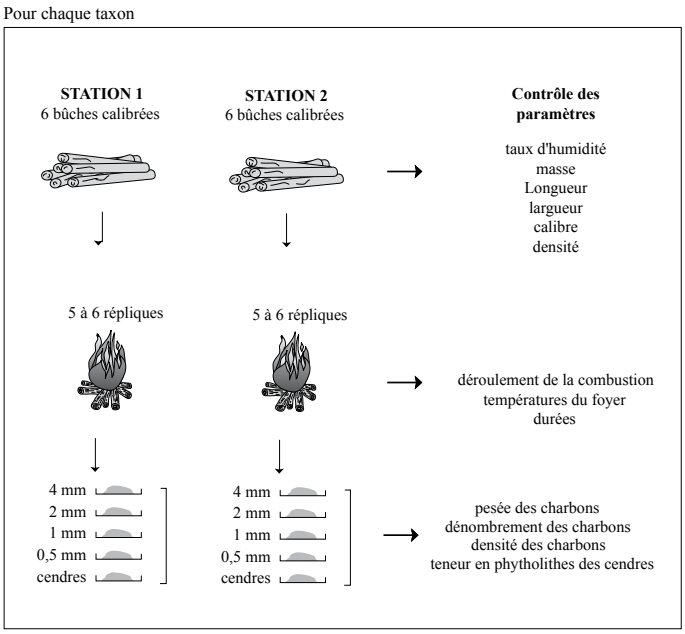


Fig. 2 - Protocole expérimental.

Le nombre résiduel de charbons de bois est-il dépendant de la quantité de bois ?

La première mesure a porté sur la relation entre la quantité de bois mise au feu exprimée en volume et le nombre résiduel de charbons de bois exprimé en nombre de fragments : le nombre résiduel de charbons de bois est-il proportionnel à la quantité de bois mise au feu et ce, indépendamment du taxon considéré ? La quantité de bois est ici exprimée en volume car les combustions sont réalisées sur des lots de bûches de même volume[1], mais de masse très variable en fonction de la densité de l'espèce[2]. Raisonner sur les masses de bois reviendrait à travailler sur des feux non standardisés entre espèces, et les mesures ne seraient pas comparables.

La figure 3, sur laquelle chaque point représente une combustion, indique que le nombre de charbons tend logiquement à augmenter avec le volume de bois, mais la régression montre l'indépendance statistique de la relation (R^2=0,04) : le nombre de charbons de bois n'est pas une fonction de la quantité de bois mise au feu, lorsque varient les paramètres : espèce, station. Il n'est par conséquent pas possible de chercher à déduire de la quantité de charbons de bois retrouvée en contexte archéologique une quantité de bois mise au feu. Remarquons que cette absence de corrélation entre la quantité de bois et celle de résidus carbonisés est démontrée en conditions de combustion standardisées, elle est donc *a fortiori* vraie, et certainement plus marquée encore, en conditions réelles, lorsque varient des paramètres tels que l'aération du feu, le calibre des tiges ou la forme de la structure de combustion, par exemple. Sur le graphique 4, nous pouvons observer un effet de groupe : le regroupement des points de même couleur qui représentent un même taxon individualisé par station, montre une reproductibilité de la mesure, traduisant un comportement au feu sensiblement identique des répliques d'une même expérience. Cette reproductibilité des résultats tend d'une part à valider le protocole et suggère d'autre part l'existence une corrélation entre les taxons et le nombre résiduel de charbons de bois.

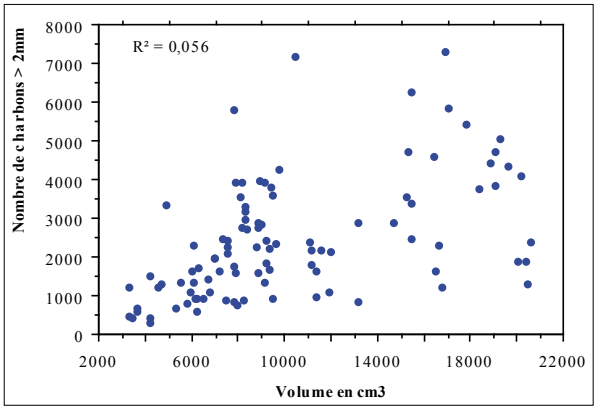


Fig. 3 - Relation entre le volume de bois mis au feu et le nombre de charbons de bois résiduels >2mm.

La variabilité stationnelle

Les résultats sont exprimés en taux de résidus[3] afin d'uniformiser et de comparer les expériences (fig. 4).

D'après le graphique, les répliques d'une même

[1] Fixer le volume de bois et le calibre des bûches est important pour standardiser l'aération du feu, ce que ne permettraient pas des lots de bûches de masse égale.

[2] C'est pour la même raison que le bois de feu est vendu dans le commerce en stère et non en tonne.

[3] Nombre de charbons de bois supérieurs à 2 mm sur volume initial de bois.

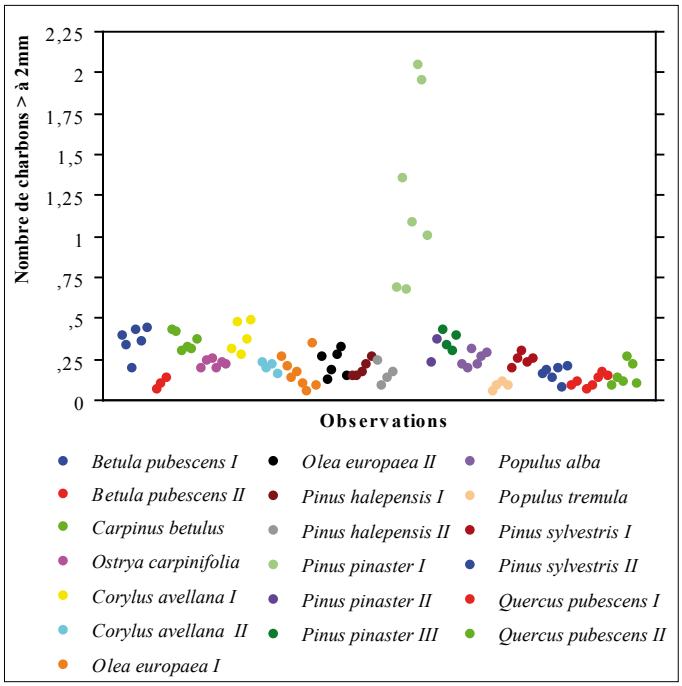


Fig. 4 - Projection du nombre de charbons de bois > 2mm pour chaque station.

expérience fournissent des résultats très proches pour 18 des 19 stations testées[4]. Seule la station *Pinus pinaster* I se singularise par un taux de résidus très nettement supérieur et de grandes variations entre les répliques. Exception faite de *Pinus pinaster* I, la reproductibilité de la mesure dans les répliques pour 18 stations (10 espèces) valide les résultats de l'expérimentation.

La variabilité stationnelle est évaluée par comparaison des résultats obtenus pour les deux stations d'échantillonnage de chaque espèce (fig. 5). Sur chaque graphique est représenté le taux moyen de résidus pour les deux stations d'origine. La variabilité stationnelle n'est pas significative pour *Quercus pubescens*, *Olea europaea* et *Pinus halepensis*, les deux lots laissant en moyenne un taux de résidus équivalent. Inversement, elle est significative pour *Pinus sylvestris*, *Corylus avellana*

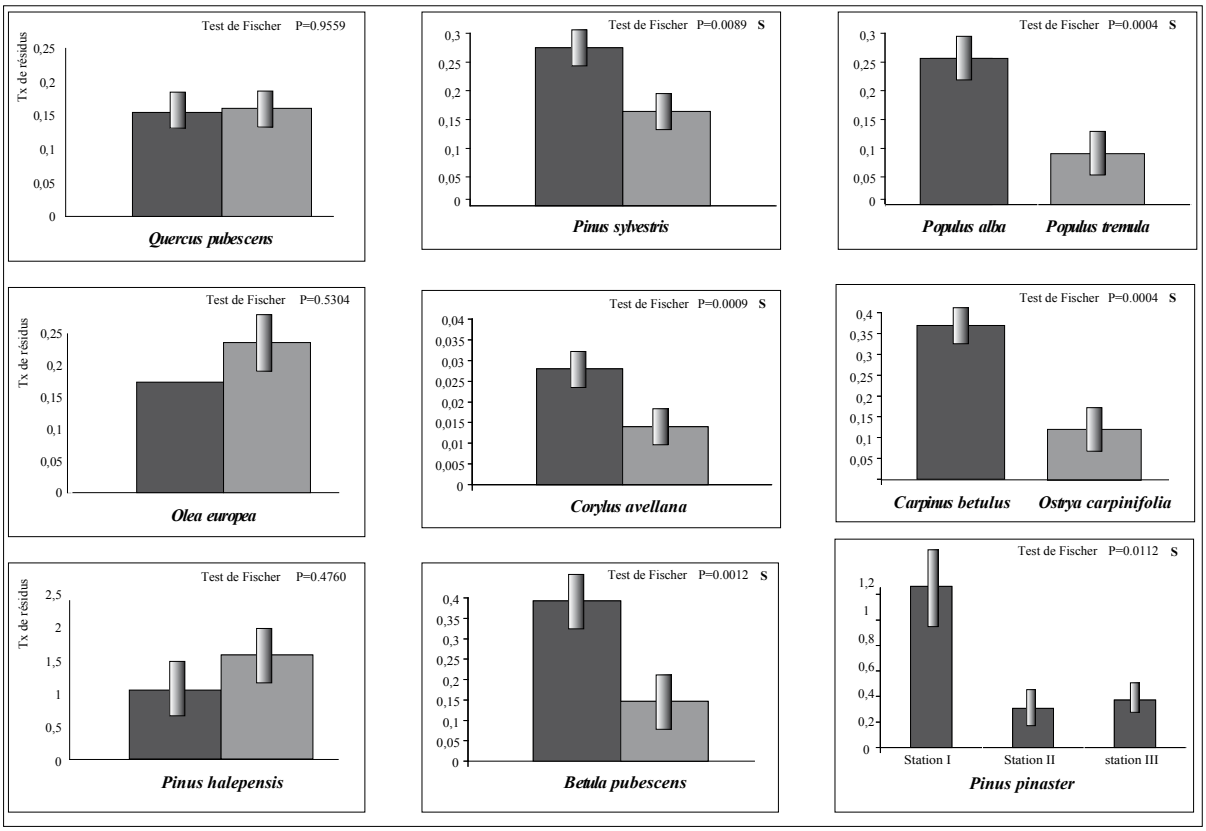


Fig. 5 - Analyse de la variance du taux de charbons de bois > 2mm « effet station ».

[4] Les points de même couleur représentent les répliques d'une même expérience c'est-à-dire l'ensemble des expériences réalisées pour un taxon de même origine géographique (station).

et *Betula pubescens* qui présentent une variabilité du taux de résidus selon la station. Cette variabilité peut être due à des facteurs de croissance environnementaux, déterminant certaines caractéristiques du bois pouvant avoir une incidence sur le comportement au feu. Notamment, on peut se demander si les variations stationnelles de la densité ou de la composition chimique du bois sont déterminantes dans cette variabilité « environnementale ».

Enfin, trois taxons posent des problèmes particuliers. La station *Pinus pinaster* I présente une dispersion anormale du taux de résidus pour les six expériences réalisées. Une nouvelle série de 6 expériences réalisées avec des lots provenant d'une troisième station confirme le comportement anormal du lot de *Pinus Pinaster* I (PpI). Contrairement à la station I, les stations II et III présentent des taux de résidus comparables et cohérents avec les autres résultats (elles ne sortent pas du nuage de points). Une rapide observation au microscope des charbons de bois résiduels montre que l'écorce de PpI représente une proportion élevée des résidus analysés[5]. Or, (i) l'écorce est souvent peu représentée dans les assemblages anthracologiques, (ii) et quand elle l'est, l'espèce peut rarement être déterminée. Il faudrait alors recalculer le taux de résidus sans les écorces pour qu'il ne représente ici que les charbons déterminables, ce qui n'a pu être fait compte tenu du nombre très important de restes (9500 fragments). Ainsi, la variabilité stationnelle de *Pinus pinaster* peut être (i) réelle, mais reste à démontrer, ou/et (ii) résulter d'un biais de quantification dû à la sur-représentation de l'écorce. Sans réponse à ce stade de l'analyse, les données de la station PpI sont exclues de l'étude et seules les stations II et III, sont prises en compte. Par ailleurs, la variabilité stationnelle n'a pu être évaluée pour les lots de *Populus* et de *Carpinus* en raison d'un problème lors de l'acquisition du bois. En effet, les lots de *Populus* proviennent des deux espèces *P. alba* et *P. tremula*. Or, ces deux groupes présentent des taux de résidus statistiquement discriminés. De même, les deux stations de *Carpinus betulus*, qui sont également discriminées par leurs taux de résidus, correspondent en réalité à une station de *Carpinus betulus* et une station *d'Ostrya carpinifolia.* Par conséquent, en l'absence de station de comparaison, il n'est pas possible de conclure sur la variabilité stationnelle de *Populus alba*, *Populus tremula*, *Carpinus betulus* et *Ostrya carpinifolia*. Tout au plus, pouvons-nous supposer l'existence d'une variabilité taxinomique pour ces quatre taxons.

D'après nos résultats, la variabilité stationnelle, pour avérée qu'elle soit, n'est pas constante pour toutes les espèces. La question qui se pose ensuite est celle de la variabilité spécifique. Si la variabilité inter-spécifique est plus élevée que la variabilité intra-spécifique (stationnelle), alors cette dernière peut être considérée comme négligeable et le taux de résidus doit être analysé comme étant une variable liée à l'espèce. En revanche, si la variabilité stationnelle est plus importante il faudrait alors conclure qu'il n'existe pas de comportement moyen des espèces/genres, mais une forte variabilité du comportement au feu des populations, d'ordre environnemental, pour un même taxon.

La variabilité spécifique

Sur la figure 6 est représenté le taux de résidus enregistré pour chaque taxon (les deux stations de chaque espèce étant maintenant regroupées, à l'exception des lots de *Carpinus betulus* et d'*Ostrya carpinifolia* et de *Populus alba* et *Populus tremula* (qui ne proviennent chacun que d'une station cf. *supra*).

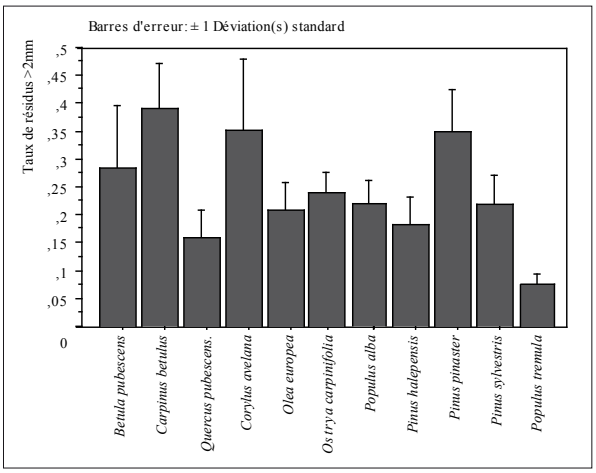


Fig. 6 - Analyse de la variance du taux de charbons de bois > 2mm « effet espèce ».

[5] L'examen des caractéristiques des lots de bois de la station I montre aussi que l'écorce est très épaisse (3,5 cm en moyenne).

www.palethnologie.org

L'analyse de la variance montre que, en dépit de la variabilité stationnelle, l'effet « espèce » est significatif avec une valeur de $p < 0.0001$. Trois groupes de taxons sont statistiquement discriminés ($F= 23,8$; $p < 0,0001$) (fig. 7). Un premier groupe composé de *Betula pubescens, Carpinus betulus, Corylus avellana et Pinus pinaster,* qui laisse en moyenne plus de résidus que les deux autres groupes ($TR_{es} = 0.334$). Un deuxième groupe, composé de *Pinus sylvestris, Olea europaea, Populus alba et Ostrya carpinifolia* dont le taux moyen de résidus ($TR_{es}=0.222$) est proche de la moyenne statistique ($TR_{es} =0.248$). Un troisième groupe, composé de *Pinus halepensis, Quercus pubescens et Populus tremula,* qui laisse en moyenne moins de résidus que les deux précédents ($TR_{es} = 0.155$). Le groupe 1 laisse en moyenne deux fois plus de résidus que le groupe 2.

Ceci signifie que, au terme de la combustion, et si l'on se réfère au groupe 2 (*Pinus sylvestris, Olea europaea, Populus alba et Ostrya carpinifolia*) dont on peut dire que le comportement au feu est proche de la moyenne statistique, les taxons *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana* et *Pinus pinaster* sont sur-représentés en nombre de charbons de bois alors que *Pinus halepensis, Quercus pubescens, Populus tremula et Ostrya carpinifolia* sont sous-représentés.

Ces résultats font apparaître une variabilité spécifique du taux de résidus dont il faut maintenant analyser le déterminisme : pourquoi la combustion n'a-t-elle pas des effets voisins sur des espèces proches ? Comment expliquer par exemple que la variabilité du taux de résidus s'exprime aussi fortement entre deux espèces du même genre (cf. *Populus alba* et *P. tremula*, *Pinus pinaster* et *P. halepensis*) ?

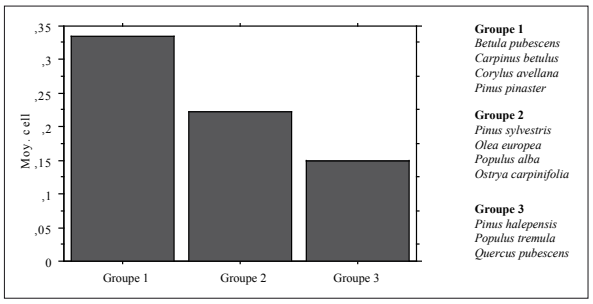


Fig. 7 - Analyse de la Variance des taxons « effet groupe ».

Effet de la densité

Tout d'abord, nous avons considéré l'effet de la ***densité*** du bois qui, selon certains auteurs, pourrait avoir une incidence sur le taux de résidus (Loreau, 1994 ; Rosen & Olson, 1985). En effet, la densité, via la porosité, a un rapport avec l'inflammabilité du bois. Sur le graphique (fig. 8) sont reportés le taux de résidus et la densité moyenne de chaque taxon. Nous observons que la densité n'a pas de relation évidente avec le taux de résidus avec un coefficient de détermination quasi nul ($R^2=0,04$). Par exemple, *Quercus pubescens* et *Carpinus betulus* qui sont tous deux des bois de forte densité sont représentés dans les groupes extrêmes (1 et 3). Il en va de même pour *Populus tremula* et *Pinus pinaster* qui sont tous deux des bois de faible densité. Plus encore *Populus tremula* et *Populas alba*, dont la densité théorique est sensiblement la même, présentent des taux de résidus très différents (fig. 9). Ce facteur n'est donc pas explicatif du taux de résidus lié à l'espèce.

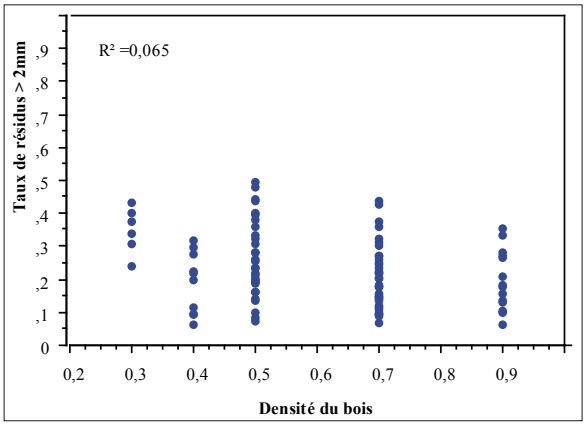


Fig. 8 - Régression densité du bois vs taux de charbons de bois > 2mm.

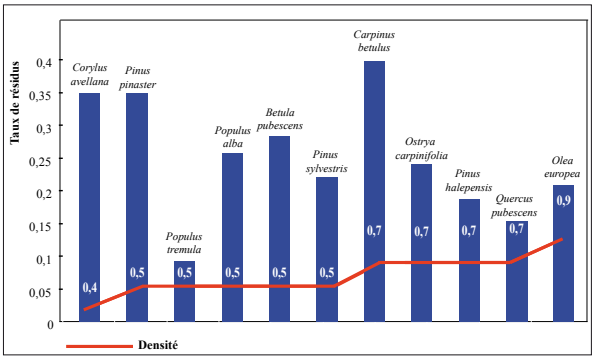


Fig. 9 - Taux de résidus et densité du bois.

www.palethnologie.org

Effet de la proximité taxinomique des espèces

Parmi les quatre espèces du groupe 1 (fort taux de résidus), trois présentent des similitudes anatomiques évidentes (*Betula pubescens*, *Corylus avellana, Carpinus betulus*) (Schweingrüber, 1978). Actuellement les genres *Betula, Corylus* et *Carpinus* sont d'ailleurs classés dans la même famille, les Betulaceae. En revanche, le groupe 2 (faible taux de résidus) est composé à la fois de Gymnospermes (Conifères) et d'Angiospermes (feuillus). Plus encore, les trois espèces du genre *Pinus* ne sont pas représentés dans le même groupe. Ainsi, si *l'anatomie* du bois ou même la chimie du bois (également liée au taxon), avaient une réelle incidence sur son comportement au feu, pourquoi les espèces ayant le plus d'affinités taxinomiques ne se trouveraient-elles pas dans le même groupe ? Il faut donc croire que le comportement au feu des espèces n'est pas dans un rapport simple avec l'anatomie du bois considérée du point de vue de la proximité taxinomique.

Effet des températures

L'enregistrement des températures au cours des combustions permet d'aborder la question récurrente de la relation entre température et taux de résidus. La régression montre l'indépendance de ces deux variables (R^2=0.1) (fig. 10). Les températures maximales moyennes enregistrées, qui varient dans nos expériences de 780 à 916°C, sont indépendantes du taux de résidus (fig. 11). Il n'y a donc pas de liaison entre la courbe de température

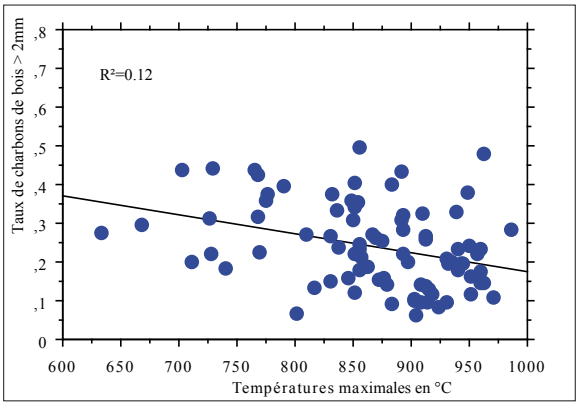


Fig. 10 - Régression températures maximales vs taux de charbons de bois > 2mm.

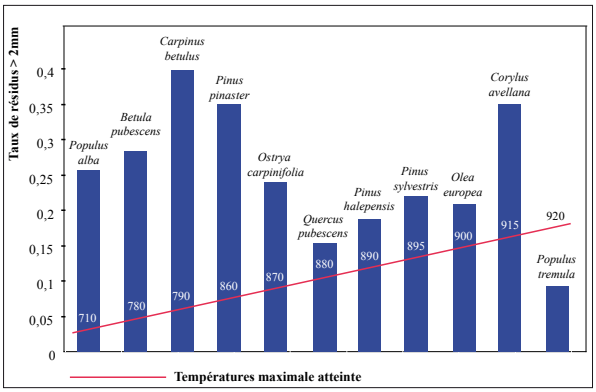


Fig. 11 - Taux de résidus et températures maximales atteintes lors de la combustion.

d'une espèce et son taux de résidus. De plus, on peut s'interroger sur la pertinence de cette mesure qui, même s'il s'agit d'une moyenne calculée à partir de 12 capteurs par combustion, peut varier de 100 à 200°C en moyenne selon la position des capteurs dans la structure.

Effet de la durée de combustion

Dans nos expériences, la durée de la combustion varie de 4 à 15 heures sans relation entre la quantité de bois mise au feu et la durée totale (fig. 12) (R^2=0.033).

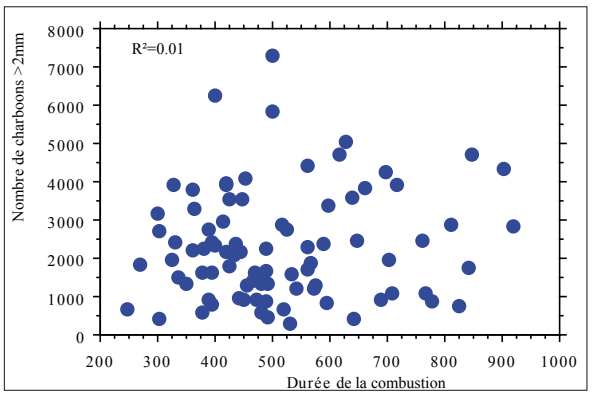


Fig. 12 - Régression durée de la combustion vs taux de charbons de bois > 2mm.

La durée de la combustion varie peu d'un taxon à l'autre à l'exception de *Carpinus betulus* et de *Quercus pubescens* qui ont des durées de combustion sensiblement plus élevées (fig. 13). Or, le taux de résidus de *Quercus pubescens* est le plus faible, alors que celui de *Carpinus betulus* est un des plus élevés. La durée de combustion de chaque espèce n'est donc pas une variable explicative de son taux de résidus.

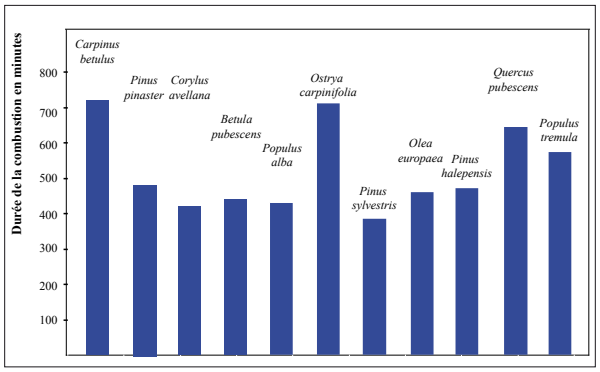


Fig. 13 - Taux de résidus et durée de la combustion.

Discussion et conclusions

Nos résultats semblent validés par la reproductibilité de la mesure au sein d'une même modalité expérimentale. Ils montrent (i) que le taux de résidus n'est pas dans une simple relation de proportionnalité avec la quantité de bois mis au feu, même moyennant des conditions de combustion standardisées ; (ii) qu'il existe un comportement au feu stationnel (intra-spécifique) aléatoire ; (iii) qu'il existe une variabilité inter-spécifique qui discrimine trois groupes de taxons. Cette variabilité spécifique ne s'explique par aucune des variables testées (densité, proximité anatomique, taxinomique, températures, durée de la combustion). Le travail expérimental met ainsi en exergue la difficulté à trouver une adéquation entre des variables, dont l'incidence semble *a priori* évidente, et le taux de charbons de bois résiduels. Nous pensons notamment aux températures et durées de la combustion, ou encore à la densité du bois qui montre de manière notable pour les deux espèces de *Populus* (P. *alba* et P. *tremula*) l'indépendance statistique entre densité du bois et taux de résidus.

Afin de comprendre la relation taxon / taux de résidus, il conviendrait de prendre en compte d'autres variables, *a priori* moins évidentes dans les effets attendus, que celles testées, notamment la microporosité[6], la composition chimique ou le bilan thermique global sans se limiter à des températures optimales.

Les groupes identifiés s'opposent par rapport à la moyenne statistique avec, d'une part, des taxons qui tendent à être sur-représentés (*Carpinus betulus*, *Betula pubescens*, *Corylus avellana* et *Pinus pinaster*) et, d'autre part, des taxons qui tendent à être sous-représentés (*Quercus pubescens*, *Populus tremula et Pinus halepensis*). Mais qu'en est-il du rapport de proportionnalité « réel » c'est-à-dire comparant l'ensemble de ces données ? Dans nos analyses, la représentation des résidus est évaluée par rapport à une moyenne statistique, calculée à partir des données individuelles (répliques) par taxon. L'Anova évalue la dispersion de chaque taxon autour de cette moyenne statistique. Mais une autre possibilité est d'évaluer de manière globale (toutes expériences confondues) la relation entre la proportion initiale de bois brûlé pour chaque taxon et la proportion de charbons de bois résiduels qui s'y rapporte. Il s'agit ni plus ni moins d'un diagramme anthracologique présentant les proportions *ante* et *post* combustion (fig. 14). Bien entendu, ces espèces n'ont pas été brûlées ensemble, il ne s'agit que d'une représentation graphique.

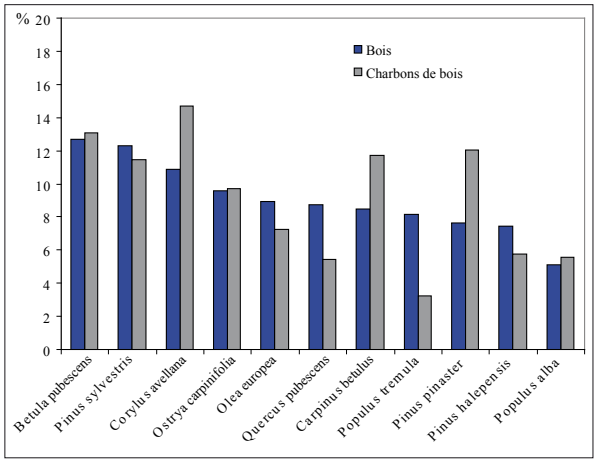


Fig. 14 - Rapport de proportionnalité entre la quantité de bois mise au feu et la quantité de charbons de bois résiduelle.

Nous observons que le rapport de proportionnalité est respecté pour six des onze taxons analysés, (différence < à 2%) : *Betula pubescens, Pinus sylvestris, Ostrya carpinifolia, Olea europaea, Pinus*

[6] La porosité du bois pourrait être mesurée par la densité de vaisseaux et la conductivité vasculaire, deux variables anatomiques prises en compte en écoanatomie quantiative, qui dépendent de l'espèce et varient aussi avec les paramètres du climat (variations stationnelles) (Bourquin-Mignot *et al.*, 1999, p. 101).

www.palethnologie.org

halepensis et *Populus alba.* Trois taxons sont sur-représentés : *Corylus avellana, Carpinus betulus* et *Pinus pinaster* alors que deux sont sous-représentés : *Quercus pubescens* et *Populus tremula.*

Ainsi, dans l'ensemble, les proportions de charbons de bois reflètent relativement bien les proportions initiales des essences mises au feu et il n'y a pas d'inversion des valeurs majoritaires et minoritaires. Il convient toutefois de noter que le taux de résidus de quelques taxons reflète mal le taux de bois mis au feu. De plus, ces résultats n'intègrent pas les interactions potentielles et probables des essences, qui existeraient si elles avaient brûlé ensemble.

Par ailleurs, en contexte archéologique, se pose la question de la distinction anatomique d'essences dont le comportement au feu n'est pas similaire. Par exemple, la discrimination anatomique de *Pinus pinaster* et *P. halepensis* (respectivement sur- et sous-représentés), si elle reste théoriquement possible, peut dans certains cas s'avérer problématique. Le problème est identique pour *Populus alba* et *Populus tremula*, discriminés dans nos expériences mais anatomiquement comparables. Il serait alors difficile de statuer sur la représentativité quantitative de ces taxons, sur la seule base de nos expérimentations.

Les résultats présentés ici demeurent incomplets et nombre d'autres observations devront être réalisées à partir de ces mêmes données. Se pose notamment la question de la représentativité des différentes classes de taille des charbons de bois, séparées par criblage avec une colonne de tamis. Une des fractions représente-t-elle mieux la proportion initiale de chaque espèce brûlée ? Les données ont été analysées ici de manière globale (fraction supérieure à 2 mm) alors que nos données nous permettent de traiter les classes N > 4 mm et 2 < N > 4 mm indépendamment les unes des autres. D'autre part, l'expression des résidus en masses, et non plus en nombre de fragments, n'a pas été abordée. Restent ainsi en suspens, des interrogations relatives à la relation entre le nombre et la masse résiduelle de charbons de bois, la représentativité des deux mesures et le rapport de proportionnalité entre le volume de bois brûlé et la masse résiduelle de charbons de bois. Par ailleurs, il faudrait comparer nos résultats avec des combustions réalisées à l'extérieur — ou à l'intérieur mais introduisant des variables telle qu'une aération contrôlée du feu — pour lesquelles les facteurs extrinsèques se surimposent aux facteurs intrinsèques et pourraient supplanter et annuler les effets enregistrées dans nos expériences.

Pour terminer, rappelons que considérer la combustion comme un agent de distorsion possible des diagrammes anthracologique ne suffit pas. Il faut bien entendu intégrer, en amont, les pratiques de la collecte et, en aval, l'impact des agents dépositionnels et post-dépositionnels sur les assemblages. Or, en l'état actuel des connaissances, les mesures expérimentales portant sur le comportement différentiel des essences sont rares. Les travaux en cours sur le sujet devraient contribuer largement à combler ce retard.

Auteurs

Isabelle Théry-Parisot & Alain Carré

Centre d'étude Préhistoire, Antiquité, Moyen Âge (CEPAM UMR 6130 CNRS), 250 rue Albert Einstein, 06560 Valbonne, France.

thery@cepam.cnrs.fr

carre@cepam.cnrs.fr

Lucie Chabal & Laurent Bouby

Université Montpellier 2, Centre de Bio-Archéologie et d'Écologie (CBAE UMR 5059 CNRS), Institut de Botanique, 163 rue A. Broussonet, 34090 Montpellier, France

chabal@univ-montp2.fr

laurent.bouby@univ-montp2.fr

Maria Ntinou

Department of Management of Cultural Heritage and Technologies, Ioannina University, Greece.

maria.ntinou@uv.es

Références

Badal-Garcia E. 1992 - L'anthracologie préhistorique : à propos de certains problèmes méthodologiques. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 139 : 167-189.

Belcher C.M., Collinson, M.E. & Scott, A.C. 2005 - Constraints on the thermal energy released from the Chicxulub impactor: new evidence from multi-method charcoal analysis. London, *Journal of the Geological Society*, 162 : 591-602.

Bourquin-Mignot M. *et al.*, 1999 - *La botanique*. Collection Archéologiques, Ferdière. Paris, éditions Errance, 207 pp.

Braadbaart F. & Poole I. 2008 - Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts. *Journal of Archaeological Science*, 35 : 2434-2445.

Chabal L. 1982 - *Méthodes de prélèvement des bois carbonisés protohistoriques pour l'étude des relations homme-végétation*. D.E.A., Université de Montpellier II., 54 pp.

Chabal L. 1988 - Pourquoi et comment prélever les charbons de bois pour la période antique : les méthodes utilisées sur le site de Lattes (Hérault). *Lattara*, 1 : 187-222.

Chabal L. 1989 - Perspectives anthracologiques sur le site de Lattes (Hérault). *Lattara*, 2 : 53-72.

Chabal L. 1992 - La représentativité paléo-écologique des charbons de bois archéologiques issus du bois de feu. *In :* Les charbons de bois, les anciens écosystèmes et le rôle de l'Homme, Vernet J.-L. (ed). Actes du Colloque International Montpellier, 10-13 septembre 1991. *Bulletin de la Société botanique de France*, 139, 2-4 : 213-236.

Chabal L. 1997 - Forêts et sociétés en Languedoc (Néolihique final, Antiquité tardive). L'anthracologie, méthode et paléoécologie. *Documents d'Archéologie Française*, 63, 189 pp.

Delhon C. ce volume - Phytolithes et taphonomie, apport de l'expérimentation à la quantification des phytolithes dans les cendres de bois. *In* : Taphononomie des résidus organiques brûlés et des structures de combustion en milieu archéologique, Théry-Parisot I., Chabal L. & Costamagno S. (eds). Actes de la table ronde, Valbonne, 27-29 mai 2008. *P@lethnologie*, 2 : 97-109.

Heinz C. 1990 - Dynamique des végétations holocènes en Méditerranée nord occidentale d'après l'anthracoanalyse de sites préhistoriques : méthodologie et paléoécologie. *Paléobiologie continentale,* XVI, 212 pp.

Lingens A., Windeisen E. & Wegener G. 2005 - Investigating the combustion behaviour of various wood species via their fire gases. *Wood Science and Technology*, 39 : 49-60.

Loreau P. 1994 - *Du bois au charbon de bois : approche expérimentale de la combustion*. Université de Montpellier II, Montpellier, 64 pp.

Rossen J. & Olson J. 1985 - The controlled carbonisation and archaeological analysis of SE U.S. wood charcoals. *Journal of Field Archaeology*, 12 : 445-456.

Scott A.C. & Jones T.P. 1991 - Microscopical observations of Recent and fossil charcoal. *Microscopy and Analysis,* 24 : 13-15.

Smart T.L. & Hoffman E.S. 1988 - Environmental interpretation of archaeological charcoal. *In* : *Current paleoethnobotany*, Hastorf C.A. & Popper V.S. (eds).Chicago and London, University of Chicago press : 165-205.

Schweingrüber F.H. 1978 - *Anatomie microscopique du bois*. Institut fédéral de Recherche Forestière, Zurcher A. G., 126 pp.

Théry-Parisot I. 2001 - *Economie des combustibles au Paléolithique. Expérimentation, anthracologie, taphonomie*. D.D.A. n° 20, CNRS-Editions, 195 pp.

Théry-Parisot I., Chabal L. & Chrazvzez J., 2009 - Anthracology and taphonomy, from wood gathering to charcoal analysis. A review of the taphonomic processes modifying charcoal assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,* 291, 1 : 142-153.

Vaughan A. & Nichols G.J. 1995 - Controls on the deposition of charcoal: Implications for sedimentary accumulations of fusain. *Journal of Sedimentary Research*, A65 : 129-135.

Pour citer cet article

Théry-Parisot I., Chabal L., Ntinou M., Bouby L. & Carré A. 2010 - Du bois aux charbons de bois : approche expérimentale de la combustion. *In* : Taphononomie des résidus organiques brûlés et des structures de combustion en milieu archéologique, Théry-Parisot I., Chabal L. & Costamagno S. (eds). Actes de la table ronde, Valbonne, 27-29 mai 2008. *P@lethnologie*, 2 : 81-93.

P@LETHNOLOGIE

Revue bilingue de Préhistoire