



Propriétés combustibles des ossements : données expérimentales et réflexions archéologiques sur leur emploi dans les sites paléolithiques

Isabelle Théry-Parisot, Sandrine Costamagno

► To cite this version:

Isabelle Théry-Parisot, Sandrine Costamagno. Propriétés combustibles des ossements : données expérimentales et réflexions archéologiques sur leur emploi dans les sites paléolithiques. Gallia Préhistoire – Archéologie de la France préhistorique, 2005, 47, pp.235-254. 10.3406/galip.2005.2051 . hal-00425650

HAL Id: hal-00425650

<https://hal.science/hal-00425650>

Submitted on 22 Oct 2009

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

PROPRIÉTÉS COMBUSTIBLES DES OSSEMENTS

Données expérimentales et réflexions archéologiques sur leur emploi dans les sites paléolithiques

Isabelle THÉRY-PARISOT* et Sandrine COSTAMAGNO**

Mots-clés. *Combustibles, os brûlés, foyer paléolithique, expérimentation.*

Résumé. *L'hypothèse d'un emploi de l'os comme combustible est formulée pour expliquer l'abondance des os brûlés au sein de certains ensembles osseux archéologiques. Cette utilisation est souvent mise en parallèle avec une pénurie de bois dans l'environnement immédiat des sites. Pourtant, l'usage de l'os semble attesté tout au long du Paléolithique supérieur indépendamment des conditions climatiques ambiantes. En effet, certaines de ces occupations sont contemporaines d'épisodes tempérés au cours desquels les données paléoenvironnementales montrent l'existence d'un milieu forestier. Ne peut-on pas alors envisager une utilisation raisonnée de ce combustible, indépendante de la biomasse ligneuse disponible mais en relation étroite avec les activités domestiques mises en œuvre sur le site ? Seule la connaissance des propriétés combustibles de l'os peut apporter des éléments de réponse quant à l'hypothèse de son utilisation préférentielle selon la fonction du foyer. C'est dans cet objectif qu'un vaste programme expérimental a été mis en œuvre. Les expériences, qui ont porté sur plus de 120 kg d'os, ont été réalisées dans des conditions standardisées avec un contrôle très rigoureux de l'ensemble des paramètres intrinsèques et extrinsèques qui régissent la combustion. Les résultats obtenus nous ont permis de définir avec précision les propriétés combustibles des os selon leur nature histologique, leur taux d'humidité et leur fracturation. La connaissance précise de ces propriétés nous permet également de distinguer les assemblages osseux qui ont réellement été utilisés comme combustible de ceux qui présentent des stigmates de combustion « accidentels ». Nous pouvons ainsi comparer les propriétés de l'os et du bois, mieux cerner les motivations d'un emploi préférentiel de l'os et proposer un modèle de gestion des combustibles adapté aux besoins énergétiques de chaque groupe.*

Key-words. *Fuels, burnt bones, Palaeolithic hearths, experimentation.*

Abstract. *The hypothesis of bone being used as fuel is put forward to explain the abundance of burnt bones inside bone assemblages. This utilization is often compared with the lack of wood in the surroundings of sites. Yet, utilization of bone seems to be attested all along the Upper Palaeolithic aside ambient climatic conditions. As a matter of fact, some of the occupations are contemporaneous with temperate phases when palaeoenvironmental data show the existence of a forest environment. Therefore, it is possible to consider a well-reasoned utilization of this fuel, regardless the available ligneous biomass but deeply connected to local household activities. Only the knowledge of the combustible properties of bone may bring part of an answer about this preferential utilization as a hypothesis, according to the function of the hearth. A vast experimental programme is undertaken for this purpose. The experiments on more than 120 kg of bone were carried out along with intrinsic and extrinsic parameters which govern combustion. The results allow us to determine precisely the bone combustible properties along with their histological nature, the level of humidity and the fractures. We can also distinguish bone assemblages strictly being used as fuel from those having fortuitous combustion marks. Therefore, the properties of bone and wood can be paralleled and so it is possible to define more clearly the purpose of a preferential utilization of bone and to propose a model of fuel management appropriate to energy needs of each group.*

* Centre d'études Préhistoire, Antiquité, Moyen Âge, CNRS, UMR 6130, Sophia Antipolis, 250 rue Albert-Einstein, F-06560 Valbonne. Courriel : thery@cepam.cnrs.fr.

** UMR 5608 du CNRS, UTAH, Université de Toulouse-Le Mirail (Toulouse-II), 5 allée Antonio-Machado F-31058 Toulouse Cedex 9. Courriel : costamag@univ-tlse2.fr.

Schlagwörter. *Brennstoffe, verbrannte Knochen, paläolithische Rastplätze, Experiment.*

Zusammenfassung. *Zur Erklärung des hohen Anteils verbrannter Knochen innerhalb bestimmter archäologischer Knochenserien gibt es die Hypothese, daß Knochen als Brennstoff verwendet worden sind. Dies wird häufig mit Holzmangel in der unmittelbaren Umgebung des Fundplatzes in Verbindung gebracht. Allerdings scheint das Phänomen unabhängig von den herrschenden klimatischen Verhältnissen während des ganzen Altpaläolithikums belegt. Vielleicht kann man also von einer planmäßigen Verwendung dieses Brennstoffs ausgehen, die sich unabhängig von der Verfügbarkeit hölzerner Biomasse, dafür aber in engem Zusammenspiel mit den häuslichen Aktivitäten am Fundplatz ergab ? Zur Hypothese eines je nach Funktion des Rastplatzes bevorzugten Einsatzes von Knochen als Brennmaterial kann nur die genaue Kenntnis seiner Brennstoffeigenschaft weiterführende Argumente liefern. Im Hinblick darauf wurde deshalb ein breit angelegtes Versuchsprogramm durchgeführt. Die Experimente, für die wir mehr als 120 kg Knochen verwendet haben, wurden unter standardisierten Bedingungen durchgeführt, sowie unter strenger Kontrolle aller inneren und äußeren Parameter, die die Verbrennung steuern. Anhand der Ergebnisse konnten wir die Brennstoffeigenschaften von Knochenmaterial entsprechend seiner histologischen Beschaffenheit, seines Feuchtigkeitsgehalt und seines Fragmentierungsgrades präzise definieren. Die genaue Kenntnis dieser Eigenschaften erlaubt gleichzeitig die Unterscheidung von Knochendepots, die tatsächlich als Brennmaterial gedient haben von solchen, die Anzeichen « zufälliger » Verbrennung aufweisen. In der Folge können wir auch die Eigenschaften von Knochen mit denen von Holz vergleichen, die Hintergründe eines bevorzugten Einsatzes von Knochen besser umreißen und ein Modell einer an den Energiebedarf des jeweiligen Verbandes angepassten Brennstoffwirtschaft vorschlagen.*

Übersetzung: Stefan WIRTH

L'usage de l'os comme combustible est une hypothèse formulée pour expliquer, dans de nombreux gisements, l'abondance des os brûlés au sein des ensembles osseux archéologiques (Perlès, 1977 ; Thiébaut, 1980 ; Bombail, 1987 ; Bon, Gambier *et al.*, 1998 ; Costamagno, *et al.*, 1998 ; Théry-Parisot, 1998, 2001, 2002a ; Castel, 1999, 2003 ; Costamagno, 1999, 2000 ; Villa, Bon, 2002). Cette utilisation est souvent mise en parallèle avec une pénurie de bois dans l'environnement immédiat des sites. Pourtant, l'usage de l'os semble attesté tout au long du Paléolithique indépendamment du taux de boisement et des conditions climatiques ambiantes, ce qui conduit à s'interroger sur les motivations de cette utilisation. En alternative à une interprétation qui ne prend en compte que les conditions du milieu, ne peut-on imaginer une vision moins déterministe qui intègre la capacité des groupes à exploiter rationnellement toute la gamme des matériaux combustibles disponibles ? Il s'avère en effet que le choix des combustibles ne se limite pas au bois mais intègre souvent une palette plus diversifiée qui compte des végétaux non ligneux (Albert, Lavi *et al.*, 1999 ; Albert, Weiner *et al.*, 2000) des charbons fossiles (Théry *et al.*, 1995, 1996 ; Théry-Parisot, Meignen, 2000), de l'os et, selon toute vraisemblance, mais cela reste à démontrer, des excréments de grands et petits herbivores. Ainsi, le choix des combustibles serait intimement lié à la fonction des foyers préhistoriques (lumière, chauffage, cuisson directe et indirecte, séchage, fumage, etc.) (Théry-Parisot, 2001, p. 145), ce que semblent confirmer l'ethnologie (Levi-Strauss, 1962) et l'ethnoarchéologie (Alix,

1998). L'emploi de l'os comme combustible pourrait-il correspondre alors à des besoins spécifiques ? Il semble évident que la réponse n'est pas univoque et qu'elle dépend peut-être avant toute chose de la spécificité de chaque gisement. Pour comprendre les motivations des groupes qui ont utilisé l'os comme combustible, il est impératif d'en connaître les propriétés, de les comparer avec celles du bois et d'évaluer dans quelle mesure il pourrait se substituer à ce dernier. Or les données disponibles sont très sporadiques.

G. Clattenburg a montré que l'os possède une faible conductivité thermique qui limite son inflammabilité (Clattenburg, 1975). Pour chaque combustible, l'inflammabilité est définie par la valeur du flux incident critique, c'est-à-dire le flux thermique minimal, induit par une source de chaleur extérieure, pour qu'un fragment de combustible isolé émette des gaz en quantité suffisante pour être enflammé. D'après J. Laloy (1981), le flux incident critique de l'os est équivalent à celui du bois vert et se situe autour de 380 °C, ce qui explique l'impossibilité d'enflammer de l'os sans un minimum de bois parfaitement sec. La valeur du pouvoir calorifique de l'os (mesures en cours), c'est-à-dire la chaleur dégagée par la combustion d'un kilogramme de matière, n'est pas connue mais, sur la base des données de Susini (1988) concernant la combustion du corps humain, nous pouvons l'estimer à 1915 kcal/kg, soit une valeur comprise entre celles du bois vert et de la paille. Plus récemment, des expériences destinées à définir les propriétés combustibles de l'os ont été menées en parallèle (Costamagno *et al.*, 1998 ; Théry-Parisot, 1998, 2001, 2002a ;

Théry-Parisot *et al.*, sous presse). Ces travaux ont montré que la combustion mixte d'os et de bois présentait un avantage en termes de durée de combustion : à masse égale, plus la proportion d'os est élevée, plus la durée de la phase de production de flammes est importante. D'après ces expériences, la nature des éléments, le type de tissu (compact/spongieux) mais également leur degré de fragmentation et d'humidité apparaissent comme autant de facteurs influant sur les propriétés combustibles des ossements mis au feu.

C'est donc sur la base de ces résultats préliminaires, qui semblent valider l'hypothèse d'une possible gestion différenciée des combustibles osseux en relation avec leurs propriétés, que de nouvelles expériences ont été menées. Ces études visent à mieux quantifier les paramètres influant sur la combustibilité des ossements. Dans cet article, nous présentons les résultats d'expériences réalisées dans le cadre d'un programme de recherche financé conjointement par le CNRS et le ministère de la Recherche¹. Notre objectif est d'abord de présenter les propriétés combustibles de l'os, en considérant la diversité du tissu osseux mais aussi l'incidence de variables qualitatives et quantitatives comme le taux d'humidité et le degré de fragmentation antérieure à la combustion. Les propriétés combustibles de l'os sont ensuite comparées à celles du bois, connues ou extraites d'expériences réalisées dans le cadre du même programme. Enfin, forts de ces résultats, nous discutons des motivations qui présidaient à l'emploi de l'un ou l'autre de ces combustibles dans le contexte particulier des sites paléolithiques.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

L'expérimentation poursuit plusieurs objectifs. En premier lieu, se pose la question de la combustibilité des différentes parties anatomiques. Selon la définition, un matériau combustible est celui qui entretient sa propre combustion une fois que la source de chaleur d'ignition est éloignée. Les travaux antérieurs ont montré que l'os possédait cette capacité, mais dans ces expériences l'os était examiné de manière globale, c'est-à-dire sans considérer de possibles variations dues à la nature même de l'os (Costamagno *et al.*, 1998 ; Théry-Parisot, 1998, 2001, 2002a). Or, si au vu de la combustion elle-même, il ne fait aucun

doute que l'os spongieux se consume réellement, des doutes subsistent quant au comportement de l'os compact, dont la teneur en graisses et en matières organiques inflammables est faible. La comparaison entre la combustion de l'os compact et celle de l'os spongieux constitue le premier des objectifs de l'expérimentation. Ensuite, les extrémités distales et proximales présentent des différences sensibles de densité et de teneur en graisse, dont nous soupçonnons l'incidence sur la combustion et qu'il nous a paru nécessaire d'étudier : les extrémités distales ont une teneur en graisse plus faible et une densité plus élevée que celles des extrémités proximales. Enfin, l'humidité et la fracturation sont des éléments dont on sait d'expérience qu'ils modifient les cinétiques de la combustion et qu'il convient par conséquent d'intégrer à nos expériences.

L'expérimentation s'est déroulée dans un foyer de laboratoire afin de limiter l'incidence avérée des facteurs externes sur le déroulement de la combustion (vent, humidité atmosphérique, forme du foyer, etc.) (Théry-Parisot, 2001). Le choix s'est porté sur la combustion d'un élément squelettique particulier : l'humérus. En effet, caractérisé par une grande variabilité histologique (portions compactes et portions spongieuses de densités variables), cet os représente une bonne base comparative pour la plupart des éléments anatomiques. Afin de prendre en compte la variabilité spécifique, des humérus de différents taxons (Bœuf, Cheval, Mouton) ont fait l'objet d'expérimentations. Seuls seront présentés, dans cette contribution, les résultats obtenus sur les humérus de bœufs adultes (*Bos taurus*), les autres espèces étant en cours d'étude.

La présence de bois, qui représente toujours 15 % du poids des os, est destinée à initier la combustion. Le mode opératoire est strictement identique pour chaque expérience : le bois est d'abord disposé dans le foyer, puis les os ; l'ensemble est ensuite allumé. Aucun combustible n'est introduit dans le foyer après l'allumage mais un entretien constant permet une combustion de l'ensemble des éléments mis au feu. Dans la première série (fig. 1), le combustible osseux est constitué uniquement de portions spongieuses complètes fraîches ou sèches qui sont, soit des extrémités proximales d'humérus, soit des extrémités distales. Le séchage des os a été réalisé en étuve². Dans la seconde série, les modalités sont identiques mais les extrémités sont fracturées avant la combustion. Enfin, la troisième série a été

1. ACI jeunes chercheurs, ATIP jeunes chercheurs « Économie des combustibles au Paléolithique : approche expérimentale et applications archéologiques. »

2. Les os sont considérés comme secs lorsque, après passage à l'étuve, leur poids devient stable.

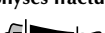
Séries	Histologie	Taux d'humidité	Nombre d'os	Nombre de répliques
série 1	proximales complètes 	frais	10	 3
	distales complètes 	frais	10	 3
	proximales complètes 	sec	10	 3
	distales complètes 	sec	10	 3
série 2	proximales fracturées 	frais	10	 3
	distales fracturées 	frais	10	 3
	proximales fracturées 	sec	10	 3
	distales fracturées 	sec	10	 3
série 3	diaphyses complètes 	avec moelle	20	 3
	diaphyses fracturées 	sans moelle	20	 3

Fig. 1 – Protocole expérimental.

réalisée avec des portions diaphysaires fraîches, soit complètes avec moelle, soit fracturées sans moelle. Chaque modalité a été répétée trois fois afin de rendre compte de la variabilité et de valider nos résultats. Une série comparable d'expériences a été réalisée avec des diaphyses complètes mais les résultats n'entrent pas dans le cadre de cette discussion. L'utilisation comme combustible des diaphyses contenant encore de la moelle est improbable, cette substance étant considérée comme hautement nutritive par la plupart des groupes de chasseurs-cueilleurs actuels. Au total, ce sont 270 humérus qui ont été brûlés.

Plusieurs descripteurs sont enregistrés au cours des expériences. Les températures constituent le premier d'entre eux. Afin d'enregistrer la variabilité des flux thermiques, très importante dans un foyer, 8 capteurs répartis sur

toute la surface enregistrent simultanément les températures, pendant toute la durée des expériences. Les données sont enregistrées puis transmises sous format informatique par infrarouge. Pour chaque expérience, nous disposons donc de 8 courbes qui expriment les températures en fonction du temps et de leur équation. Le second descripteur est relatif aux cinétiques, en distinguant la combustion avec émission de flammes de la pyrolyse sans flamme ou calcination (ce qui suit l'extinction des flammes jusqu'à la fin de la calcination). En pratique, nous avons considéré que la combustion est terminée lorsque la température moyenne du foyer enregistrée par les capteurs est inférieure à 100 °C. Cette dichotomie est due à une réalité thermique, chacune de ces phases revêt des modalités qui, traduites en termes de transfert de chaleur, ne présentent pas la même valeur. La qualité d'un même combustible est par conséquent différente selon que l'on considère l'une ou l'autre de ces phases. Les données relatives aux durées ont été pondérées, c'est-à-dire rapportée à une même quantité d'os afin d'annuler l'effet masquant des variations avérées de la masse de combustible d'une expérience à l'autre.

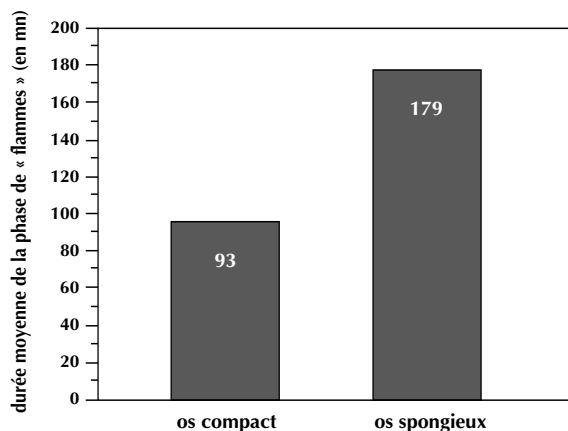
RÉSULTATS

L'OS COMPACT EST-IL COMBUSTIBLE ?

La première interrogation porte sur la capacité de l'os compact à entrer en combustion. Pour comparer le comportement des portions compactes à celui des portions spongieuses, nous avons travaillé sur la phase avec flamme, qui est la plus active de la combustion.

L'analyse de la variance (anova) montre que la nature histologique de l'os discrimine la durée de l'émission des flammes (fig. 2). À quantité égale, l'os compact brûle en moyenne 93 minutes contre 179 minutes pour l'os spongieux : cette différence est très significative. La quantité de graisse contenue dans ces portions est le facteur clé permettant d'expliquer les variations enregistrées, le tissu spongieux contenant une quantité importante de graisse au contraire de l'os compact. Pour autant, si ces résultats montrent la qualité moindre du tissu compact, ils ne permettent pas de démontrer qu'il n'est pas combustible. D'après des expériences réalisées sur le bois, il s'avère que les durées obtenues pour la combustion de l'os compact correspondent peu ou prou à la durée de la combustion d'une quantité de chêne blanc équivalente à celle présente dans les expériences avec os. Ainsi, l'essentiel de la durée de

	ddl	S. des carrés	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de p
histologie	1	18 648,375	18 648,375	7,176	0,0129
résidu	25	64 965,625	2 598,625		



Test PLSD de Fisher pour durée des flammes Effet : histologie

	Diff. moy.	Diff. crit.	Valeur p	
spong./compact	-83,6	64,2	0,0129	S

Fig. 2 – Variance de la durée des flammes selon la nature de l'os.
S : significativement différent.

la phase d'émission des flammes, pour l'os compact, est dû à la combustion du bois ajouté dans nos expériences. La part réelle de la combustion de l'os compact est donc très faible et correspond à la petite quantité de matière organique présente dans la structure de l'os (collagène notamment). De plus, si l'on éloigne la source de chaleur, l'os compact cesse de se consumer. Pour toutes ces raisons, ce tissu ne peut pas être considéré comme combustible.

Par conséquent, pour la suite de nos analyses, nous avons exploité uniquement les expériences réalisées à partir des portions spongieuses.

QUELS PARAMÈTRES DÉTERMINENT LES CINÉTIQUES DE LA COMBUSTION ?

Dans nos expériences, la durée de la phase de production des flammes et celle de la calcination enregistrent des variations importantes (de 60 à 240 minutes pour la première et de 60 à 360 minutes pour la seconde) et ce sans relation forte avec la masse de combustible mise au feu. Comme le montrent les figures 3a et 3b, la corrélation entre

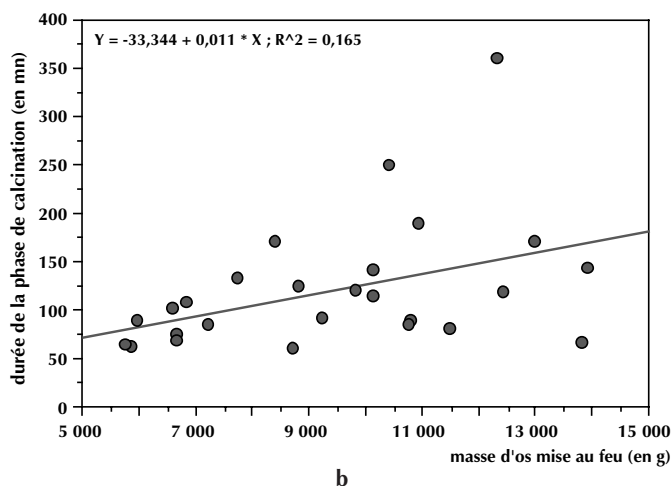
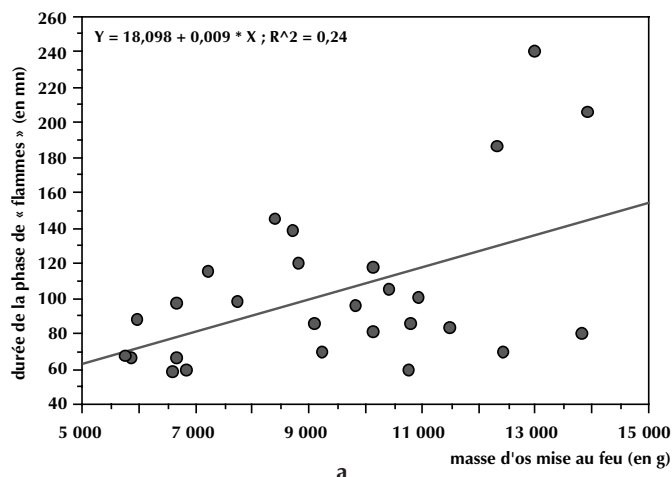


Fig. 3 – Corrélation entre la masse de combustible et la durée des phases de la combustion : a, durée de la phase de « flammes » ; b, durée de la phase de calcination.

la masse de combustible et la durée de ces phases est faible : la masse initiale explique uniquement 24 % de la variance de la durée des flammes et 16,5 % de la durée de la calcination. On doit alors admettre que les autres paramètres testés (histologie, humidité et fracturation) ont une part non négligeable dans le comportement au feu de l'os. Afin de tester cette hypothèse, nous avons travaillé, comme précédemment, sur des durées pondérées, c'est-à-dire rapportées à une même masse initiale d'os.

Nous avons voulu distinguer le comportement au feu des extrémités distales et proximales en intégrant les facteurs « humidité » et « fracturation ». La régression multiple, qui permet de tester l'effet conjoint de plusieurs variables

Nombre	24
Manquants	1
R	0,808
R carré	0,653
R carré ajusté	0,601
Éc. type résiduel	33,457

Tableau d'ANOVA

	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de p
Régression	3	42 174,125	14 058,042	12,559	< 0,0001
Résidu	20	22 386,833	1 119,342		
Total	23	64 560,958			

Variables du Modèle

	Coefficient	Erreur Std	Coeff. Std	F pour sortir
Terme cst.	452,583	56,316	452,583	64,586
Humidité	-33,083	13,659	-0,319	5,867
Extrémité	-35,083	13,659	-0,338	6,598
Fracturation	-68,583	13,659	-0,661	25,213

Fig. 4 – Effet des différentes variables sur la durée des flammes (régression multiple).

indépendantes (histologie, humidité et fracturation) sur une variable dépendante (durée des flammes) montre qu'elles ont toutes un effet significatif sur la durée de la phase de « flammes » (fig. 4) avec un coefficient de corrélation de 0,8 : ensemble, elles expliquent 65,3 % de la variabilité de la durée des flammes (R^2). La part non expliquée est principalement due à l'effet de paramètres atmosphériques (vent, humidité de l'air, pression atmosphérique) qui influencent le déroulement de la combustion, et à la masse de combustible dans une moindre mesure (voir p. 239, fig. 3a). En d'autres termes, la durée des flammes n'est pas expliquée par une seule de ces variables mais par l'effet conjugué de l'humidité, de la nature des extrémités et de leur fracturation. Pour expliquer les variations enregistrées il convient donc d'examiner successivement l'effet de chacune de ces variables.

L'analyse de la variance montre que la durée moyenne de la combustion des extrémités distales se discrimine de celle des extrémités proximales, avec 203 minutes en moyenne pour les premières et 150 minutes en moyenne pour les secondes. La durée de combustion des portions distales représente une augmentation de 55 % de la durée des proximales (fig. 5a). Comme le montre l'anova, des

variations significatives sont également dues au taux d'humidité et à la fracturation (fig. 5c). La combustion des os entiers est plus durable que celle des os fracturés. La fracturation abaisse la durée de cette phase de 45 % en moyenne (fig. 5b). De même, la combustion est plus longue lorsque les os sont frais, avec 194 minutes en moyenne alors qu'elle n'est plus que de 151 minutes lorsque les os sont secs. Ainsi, qu'il soit distal ou proximal, plus l'os est sec et fracturé, plus la durée de la combustion est brève.

Les données relatives à la durée de la calcination fournissent des résultats sensiblement différents. Comme nous l'avons dit, les variations de la durée de la pyrolyse sans flamme sont indépendantes de la masse de combustible mise au feu (fig. 3b). L'analyse de la variance de la durée moyenne (anova) montre que la durée de cette phase est uniquement discriminée par la variable « histologie » (fig. 6a). La pyrolyse sans flamme des extrémités proximales est plus de deux fois plus importante que celle des extrémités distales, avec en moyenne 166 minutes pour les premières et 71 minutes pour les secondes. En revanche, le taux d'humidité et la fracturation n'ont pas d'incidence sur cette seconde phase de la combustion. Les effets de ces variables s'expriment uniquement lors de l'inflammation, (fig 6b et 6c).

Le comportement des extrémités est donc totalement différent au cours des deux phases, le distal, c'est-à-dire le tissu spongieux le plus dense, privilégie la durée de la première phase (flammes) alors que le proximal, c'est-à-dire le tissu spongieux le moins dense, favorise celle de la seconde (calcination). Pour autant ces valeurs restent très inférieures à celles enregistrées pour des quantités équivalentes de bois.

Les expériences menées en parallèle sur un « échantillon référence » de chêne blanc permettent de comparer le comportement au feu du bois et de l'os. Lorsque l'on place les durées de la calcination de ces deux séries d'expériences sur un même plan factoriel, avec la masse de combustible en abscisse et la durée de la calcination en ordonnée, on constate que l'os se consume toujours moins longtemps que le bois (fig. 7a). Pour l'un et l'autre, nous avons calculé les modèles de régression qui permettent de prédire et de comparer la durée de la calcination des deux combustibles pour une masse identique. Dans les deux cas, les coefficients de corrélation sont toujours très élevés avec ($R = 0,9$) pour le bois et ($R = 0,8$) pour l'os, ce qui nous autorise à travailler sur des valeurs prédictives. Ainsi, pour 9 kg de combustible, l'os se consume en moyenne 1 h 11 alors que le bois

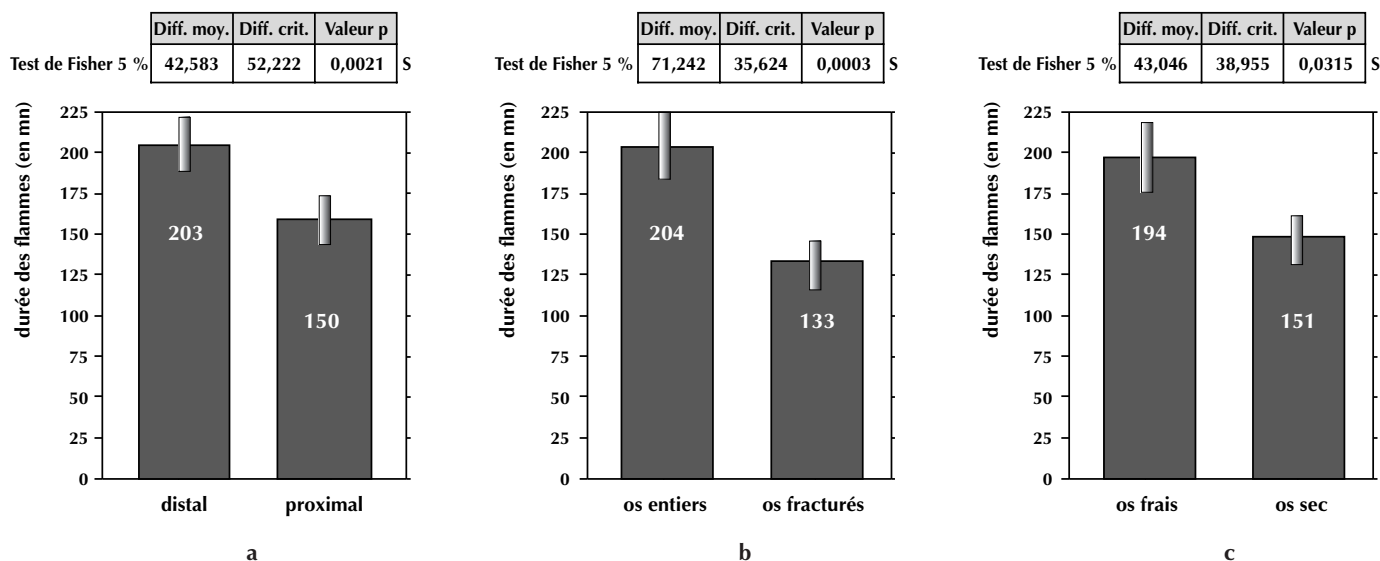


Fig. 5 – Effet des différentes variables sur la durée des flammes :
a, effet de la variable histologie ; b, effet de la variable fracturation ; c, effet de la variable humidité.

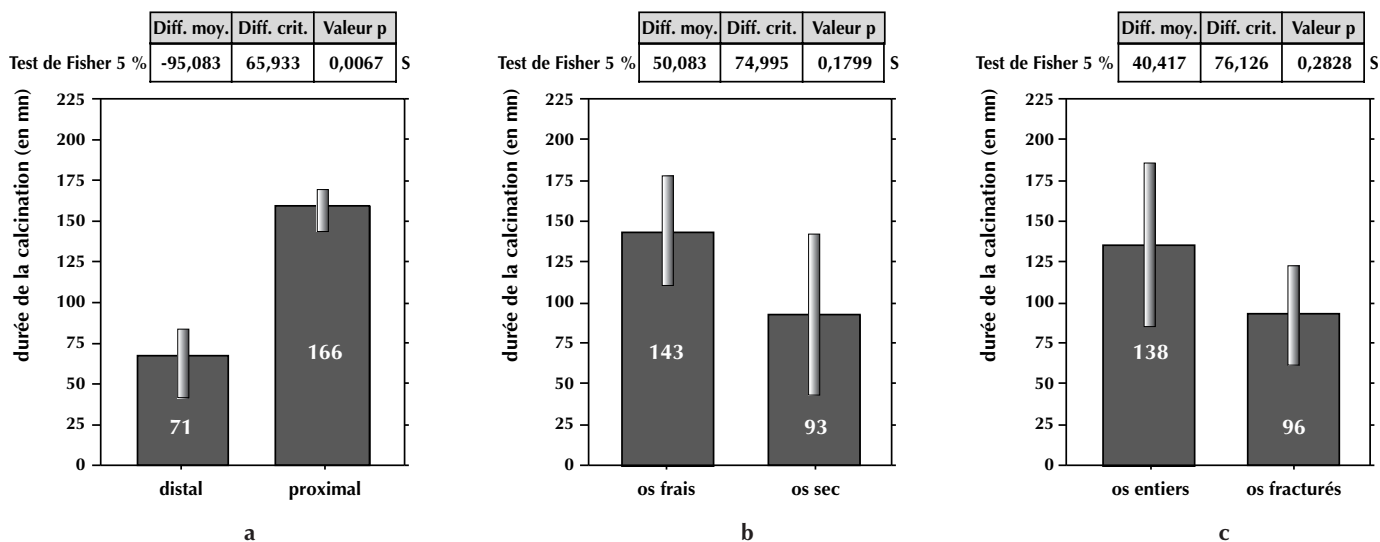


Fig. 6 – Effet des différentes variables sur la durée de la calcination :
a, effet de la variable histologie ; b, effet de la variable humidité ; c, effet de la variable fracturation.

continue à produire de la chaleur pendant 10 heures en moyenne. En termes de calcination, l'os présente donc incontestablement une qualité très inférieure à celle du bois, ce qui n'est pas le cas pour la combustion avec flammes.

Le modèle prédictif a également été calculé pour la durée des flammes (fig. 7b). Il s'agit ici de modèles non linéaires et les coefficients de corrélation sont légèrement

moins élevés (autour de 0,7). En d'autres termes, il existe d'autres variables que la masse qui influent sur la durée de cette phase (tirage, arrangement du foyer, humidité et fracturation). Les valeurs prédites pour 9 kg de combustible montrent que le bois de chêne brûle en moyenne 1 h 30 alors que l'os se consume pendant 1 h 40. Cette légère différence à l'avantage de l'os deviendrait très significative si

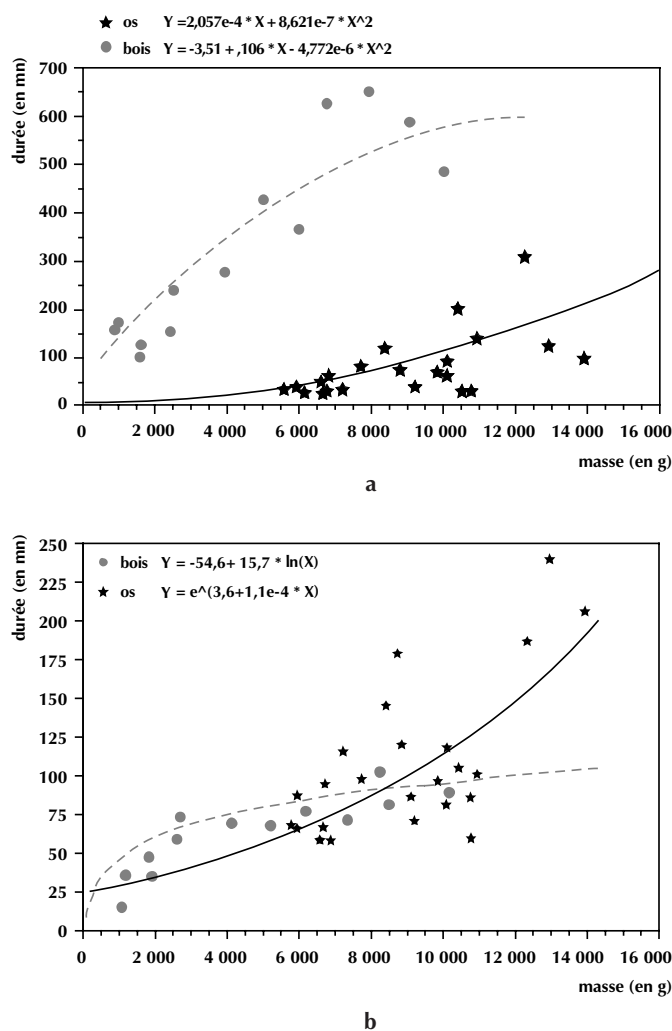


Fig. 7 – Durées comparées : a, durées de la calcination de l'os et du bois de chêne ; b, durées des flammes de l'os et du bois de chêne.

nous considérons uniquement les extrémités distales qui, comme nous l'avons vu, brûlent plus longtemps que les proximales et ce d'autant plus que l'os est frais et non fracturé. En revanche, si l'os spongieux est sec et fracturé son comportement est sensiblement équivalent à celui du bois puisque, comme nous l'avons montré précédemment, ces deux paramètres réduisent significativement la durée des flammes. Les courbes de régression nous apportent une autre information sur le déroulement de la combustion : quelle que soit la phase considérée nous constatons que, pour le bois, la durée augmente moins vite que la masse, alors que c'est l'inverse pour l'os. Ainsi, si l'on veut améliorer la durée de la combustion, il est plus rentable d'alimenter un « petit » feu de bois que de brûler simulta-

nément une grande quantité de bois. Inversement, la durée de la combustion est d'autant plus importante pour l'os que la masse initiale est élevée.

QUELLES SONT LES TEMPÉRATURES DE COMBUSTION ?

Nous nous sommes ensuite intéressées aux températures de la combustion. La présence de huit capteurs, répartis uniformément dans le foyer et prenant une mesure toutes les 2 minutes, a permis de suivre de manière précise l'évolution de ces températures dans le temps.

Dans un premier temps, nous avons cherché à caractériser les différentes séries en fonction des températures maximales. Pour chacune des combustions, nous avons donc calculé une moyenne de la température maximale enregistrée par les huit capteurs. Dans nos expériences, ces moyennes varient de 605 à 825 °C. L'effet des différentes variables sur ces moyennes a été testé par la méthode statistique des régressions multiples. Les températures sont uniquement discriminées par la masse de combustible mise au feu (fig. 8a). Le coefficient de régression est très élevé ($R = 0,83$) et près de 70 % de la variance des températures maximales est expliquée par la masse de combustible. Aucun des autres paramètres, à savoir la nature histologique de l'os, son taux d'humidité ou la fracturation n'a un effet significatif sur les moyennes des températures maximales.

Des expériences similaires menées sur le bois et prenant en compte un nombre important de variables, telles que l'espèce, le calibre, l'humidité, le volume, la surface et la masse anhydre, débouchent sur les mêmes conclusions. La masse de combustible mise au feu est essentiellement et très fortement corrélée avec la moyenne des températures maximales ($R = 0,68$) (fig. 8b). Pour le bois, la part des autres variables est non nulle mais a peu d'incidence au regard du paramètre « masse ».

Si nous comparons à présent les résultats obtenus pour l'os et le bois, les variances moyennes des températures maximales enregistrées n'apparaissent pas statistiquement différentes (fig. 9). Pour les deux combustibles, elles se situent autour de 750 °C. Ainsi, en foyer ouvert, les températures maximales dépendent davantage de la masse de combustible mise au feu que de la nature du combustible.

La moyenne des températures enregistrées pendant la phase d'émission des flammes varie entre 330 °C et 380 °C en fonction des modalités, mais ces variations ne sont pas statistiquement différentes, au contraire de la combustion

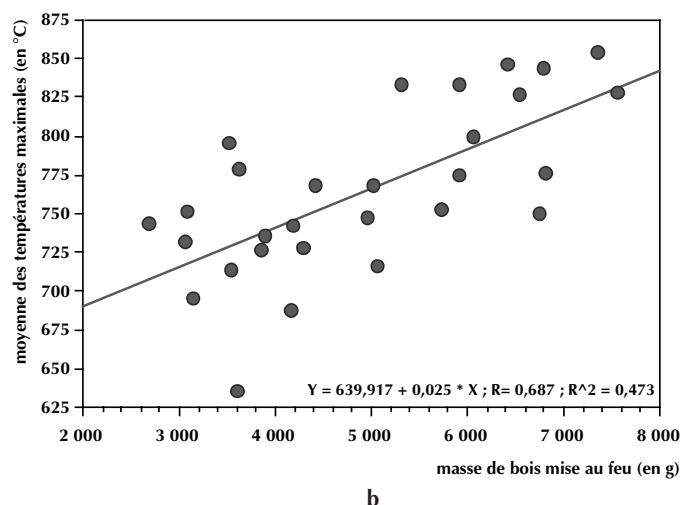
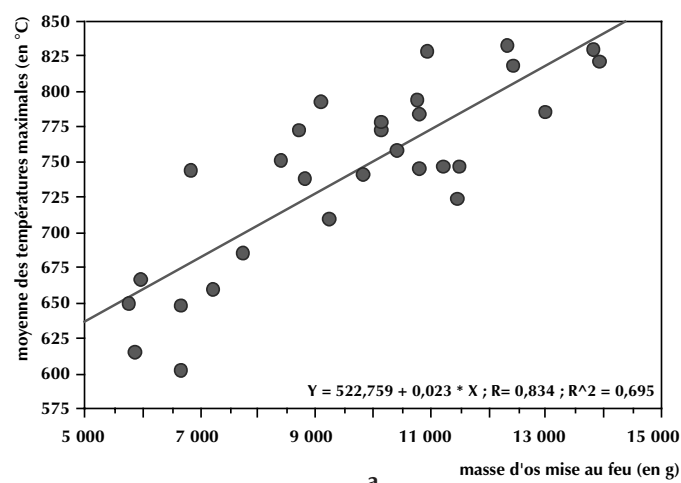


Fig. 8 – Relation entre la masse de combustible et les températures maximales.

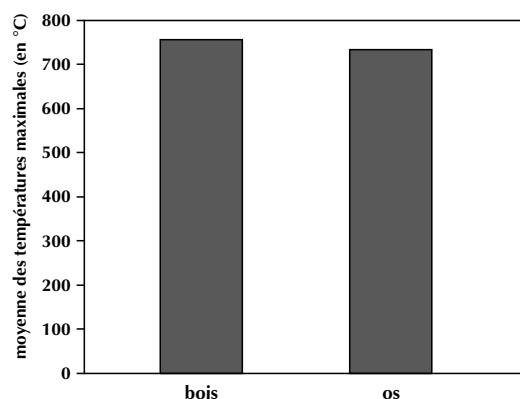
avec flammes qui est comprise entre 75 et 137 minutes. En d'autres termes, la capacité énergétique des os, pendant la phase de flammes est identique quels que soient la nature et l'état des os ; en revanche, sa puissance (c'est-à-dire la capacité d'un combustible à augmenter la température d'un corps ou d'un milieu) varie selon les modalités de la combustion (fig. 10). C'est donc une fonction de sa capacité énergétique mais également de la durée au cours de laquelle l'énergie est transmise. À capacité énergétique équivalente, ce qui est le cas dans nos expériences, plus la durée est importante, plus la puissance est élevée.

Il semble, par conséquent, plus intéressant, pour caractériser la combustion, d'étudier la répartition de la chaleur sur la durée que la simple observation de températures

	ddl	S. des carrés	Carré moyen	Valeur de F	Valeur de p
histologie	1	2 672,081	2 672,081	0,645	0,4250
résidu	65	73 742,972	1 134,507		

	Nombre	Moyenne	Dév. Std.	Err. Std.
bois	31	760,403	54,388	9,768
os	36	747,737	71,855	11,976

Graphique des interactions pour températures maximales



Test PLSD de Fisher pour températures maximales
Effet : combustible

	Diff. moy.	Diff. crit.	Valeur p
bois, os	12,666	31,506	0,4250

Fig. 9 – Variance des températures maximales selon le combustible.

maximales qui correspondent en réalité à un instant très bref et, qui plus est, ne sont pas représentatives du combustible. Nous avons ainsi subdivisé la combustion, pour chaque expérience, en sections de 30 minutes. Pour chacune de ces sections, nous avons calculé la moyenne des températures enregistrées par les 8 capteurs.

Une analyse multivariée (ACP) a ensuite été menée afin d'obtenir une image globale de la répartition des températures sur une durée de 4 heures (tabl. I). Les individus correspondent à chaque expérience (fig. 11) ; les variables correspondent à la moyenne des températures enregistrées toutes les 30 minutes pour chaque combustion ainsi que la masse de combustible dont nous soupçonnons un effet non nul. La moyenne des températures pour les modalités « proximales », « distales », « entiers », « fragmentés », « frais » et « secs » a été entrée comme individus supplémentaires.

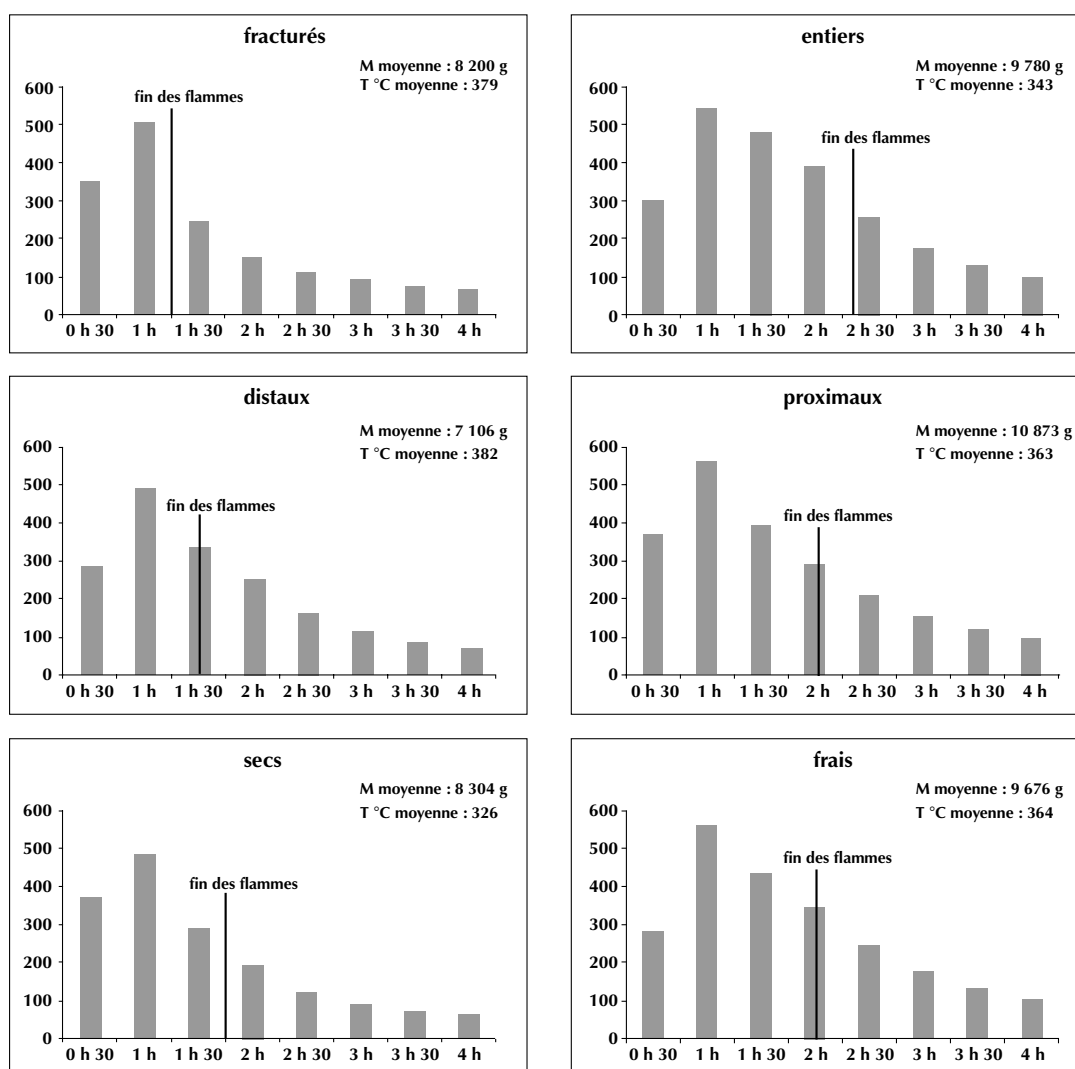


Fig. 10 – Répartition des températures enregistrées, sur 4 heures.

Les axes F1 et F2 représentent 80 % de la variabilité totale ce qui autorise l'interprétation de cette représentation graphique. Sur l'axe F1, qui est le plus important, les variables dont la contribution est la plus forte sont celles comprises entre 1 h 30 et 4 heures. Les expériences qui contribuent le plus à la réalisation de cet axe sont, dans sa partie positive, les combustions qui comportent des os entiers frais (proximaux ou distaux), opposés, dans la partie négative, aux expériences ne comportant que des os fracturés secs. Ainsi, au-delà d'une heure trente, les os entiers frais maintiennent en moyenne des températures plus élevées que les os secs et fracturés, comme le montre la figure 10.

L'axe 2 ne représente que 14 % de la variabilité et présente, par conséquent, un intérêt moindre que l'axe 1. Les variables de durée antérieures à 1 h 30 et la masse de combustibles sont celles qui contribuent le plus fortement à la réalisation de cet axe. Si l'on considère les individus dont la contribution est la plus forte, on observe que cet axe semble opposer les extrémités distales et les extrémités proximales, les températures de ces dernières étant en moyenne plus élevées pendant la première période que celle des premières. Toutefois, cette distinction pourrait n'être qu'un artefact de nos expériences. En effet, la masse des combustions réalisées avec des extrémités proximales est sensiblement plus élevée que la masse des extrémités

Tabl. I – Référence des combustions.

Expérience	Description
I1B1	humérus entiers secs
I1B2	humérus entiers secs
I1B3	humérus entiers secs
I2A1	proximales fraîches entières
I2A2	proximales fraîches entières
I2A3	proximales fraîches entières
I2B1	distales fraîches entières
I2B2	distales fraîches entières
I2B3	distales fraîches entières
I2C1	proximales sèches entières
I2C2	proximales sèches entières
I2C3	proximales sèches entières
I2D1	distales sèches entières
I2D2	distales sèches entières
I2D3	distales sèches entières
I2C1bis	proximales sèches entières
I2C2bis	proximales sèches entières
I2C3bis	proximales sèches entières
I2D1bis	distales sèches entières
I2D2bis	distales sèches entières
I2D3bis	distales sèches entières
I3A1	diaphyses fraîches entières avec moelle
I3A2	diaphyses fraîches entières avec moelle
I3A3	diaphyses fraîches entières avec moelle
I3B1	diaphyses fraîches fracturées sans moelle
I3B2	diaphyses fraîches fracturées sans moelle
I3B3	diaphyses fraîches fracturées sans moelle
I4A1	proximales fraîches fracturées
I4A2	proximales fraîches fracturées
I4A3	proximales fraîches fracturées
I4B1	distales fraîches fracturées
I4B2	distales fraîches fracturées
I4B3	distales fraîches fracturées
I4C1	proximales sèches fracturées
I4C2	proximales sèches fracturées
I4C3	proximales sèches fracturées
I4D1	distales sèches fracturées
I4D2	distales sèches fracturées
I4D3	distales sèches fracturées

distales. Or, l'analyse montre que la masse joue un rôle non nul dans le déroulement de la combustion. Il est, par conséquent, difficile de distinguer, avec ce type d'analyse, ce qui relève de la masse de ce qui relève de la nature de l'os. Au final, l'axe 2 pourrait n'opposer réellement que les ensembles frais et les ensembles secs, ces derniers fournissant en moyenne des températures plus élevées.

Afin de vérifier les résultats de la représentation graphique, nous avons procédé à une série de tests systématiques (régressions multiples et anova). Les résultats de ces analyses sont significatifs et convergents avec ceux obtenus précédemment. Au cours des premières 30 minutes, la régression multiple qui permet de tester l'effet conjoint des variables « histologie », « humidité », « fracturation » et « masse totale » met en évidence l'incidence de l'humidité dans l'élévation plus ou moins rapide des températures avec en moyenne 372 °C pour les ensembles frais et 282 °C pour les secs, la variance de la moyenne étant statistiquement différente (Test de Fisher) (fig. 12a). L'histologie ressort également en tant que variable explicative : la moyenne des températures des portions distales semble moins élevée que celle des proximales mais le test de Fisher montre que cette différence n'est pas significative ce qui semble confirmer l'incidence de la variable masse comme élément « masque » (fig. 12b). Une heure après l'allumage, la variabilité des températures enregistrées ne semble dépendre d'aucune des variables mesurées ; soit que cette variabilité est trop faible, ce qui signifierait que l'on assiste à un alignement des températures au bout d'une heure et ce quels que soient l'état et la nature des os mis au feu, soit que d'autres facteurs non mesurés ont agi. Entre une heure et trois heures, l'évolution des températures est totalement dépendante des variables « humidité » et « fracturation » comme le montrent les histogrammes de la figure 10. Les températures chutent très brutalement en dessous de 200 °C lorsque les ensembles sont secs et fragmentés alors qu'elles restent supérieures à 500 °C pour les ensembles frais et entiers, et ce indépendamment de la nature de l'os. Après trois heures, seule la masse de combustible reste une variable active, les gros ensembles refroidissent plus lentement que les petits mais la nature des assemblages brûlés n'interfère plus.

INTERPRÉTATIONS

L'OS EST UN COMBUSTIBLE AUX PROPRIÉTÉS MODULABLES

Les résultats obtenus dans le cadre de ces expériences permettent de documenter les propriétés combustibles des os. Tout d'abord, nous avons montré que seules les parties spongieuses peuvent être considérées comme combustible. L'os compact se transforme chimiquement en raison de la présence de bois mais n'apporte rien à la combustion. Ainsi,

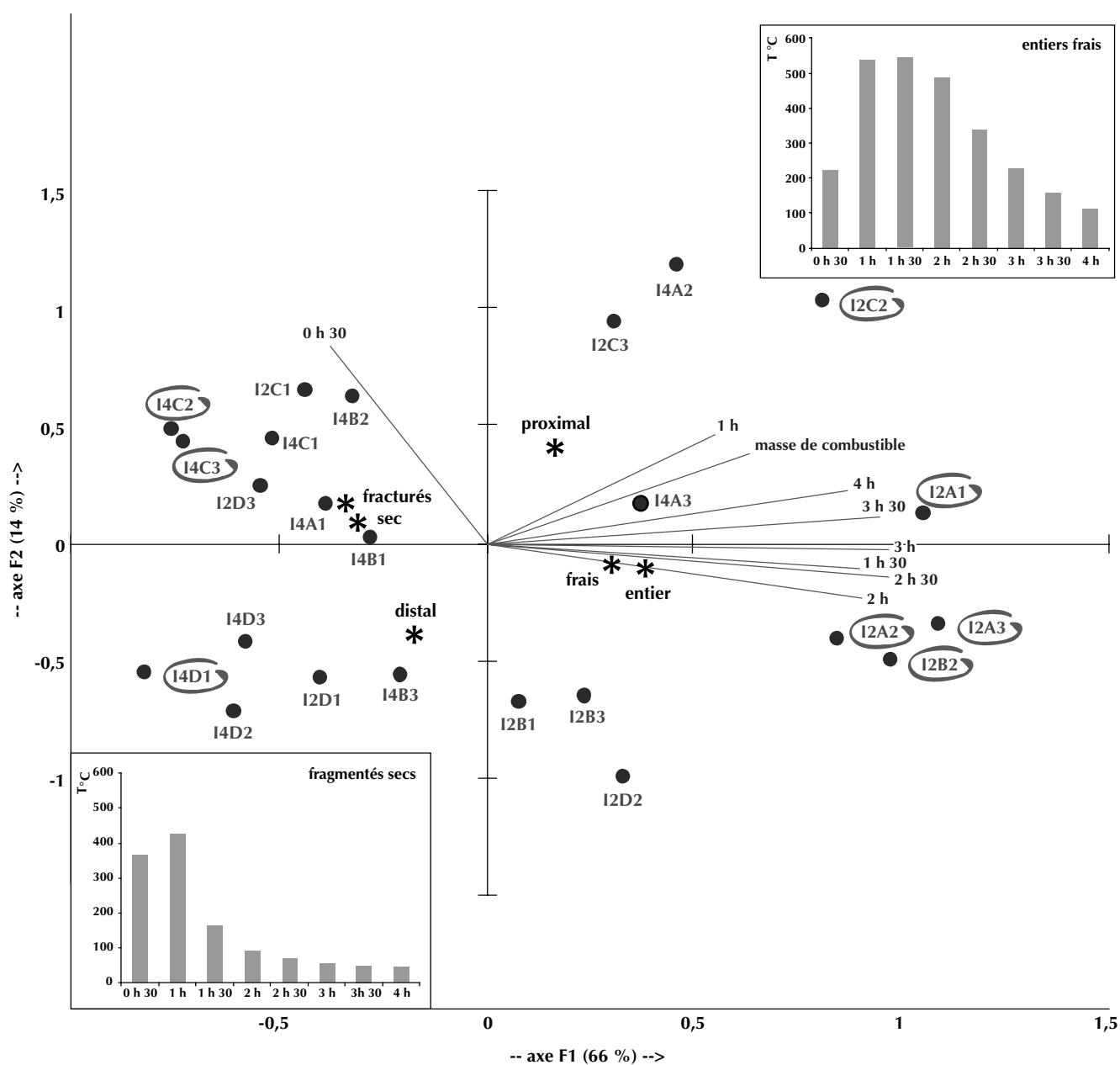


Fig. 11 – Évolution des températures : analyse multivariée.

si l'on exclut la moelle présente dans les cavités médullaires des os longs, seule la graisse contenue dans le tissu spongieux des vertèbres ou des portions articulaires est combustible. Par ailleurs, il a été démontré que les processus taphonomiques de la combustion n'induisent pas de sur-représentation des portions spongieuses (Théry-Parisot *et al.*, 2004 ; Costamagno *et al.*, 2005) et que ces portions étaient plus sensibles aux processus postdépôsi-

tionnels donc plus fragiles que les portions compactes (Knight, 1985 ; Gilchrist, Mytum, 1986). Par conséquent, la présence d'os spongieux, en abondance, dans certains foyers préhistoriques plaide résolument en faveur d'une utilisation préférentielle de ces portions pour la combustion.

Nous avons également observé une variabilité du comportement au feu des portions spongieuses selon la densité, l'humidité et la fracturation, principalement en

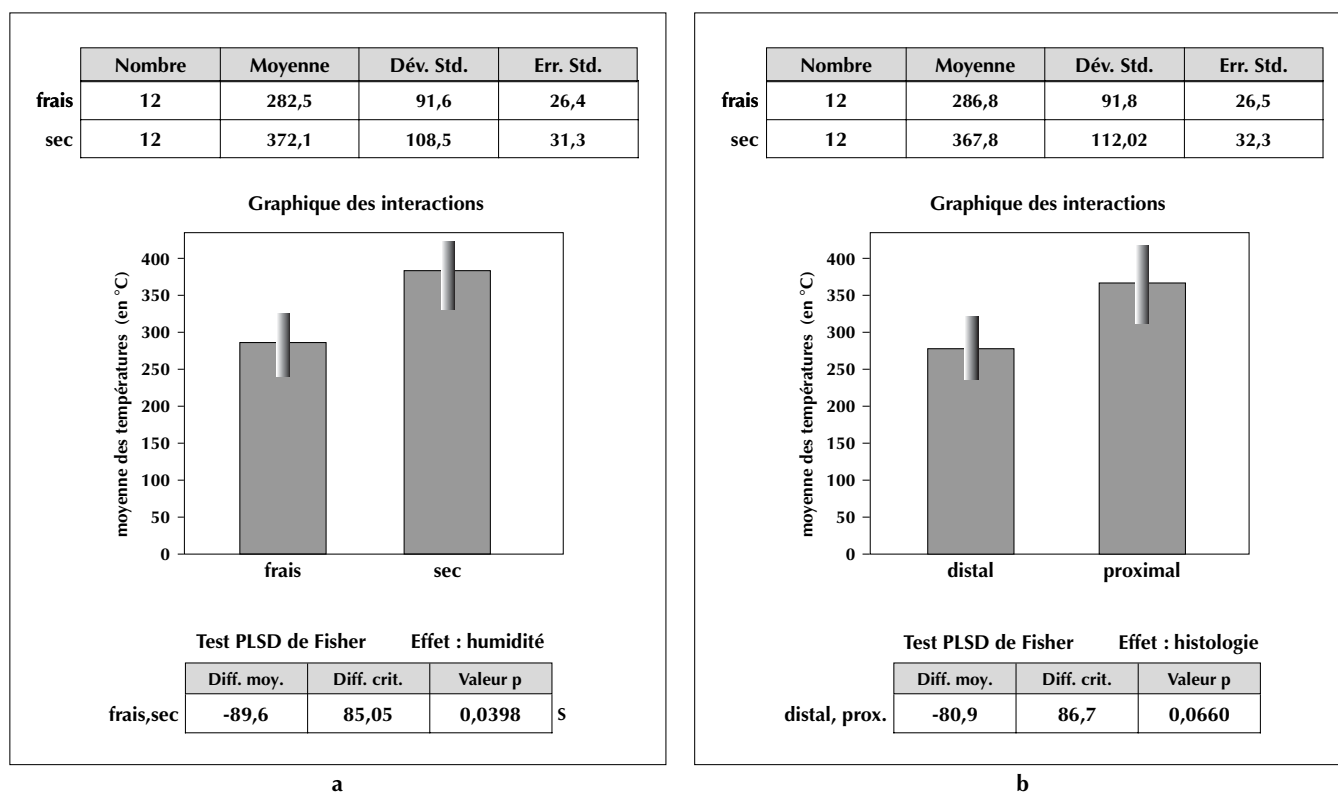


Fig. 12 – Phase d’allumage : a, effet de l’humidité sur la phase d’allumage du feu ;
b, effet de l’histologie sur la phase d’allumage du feu.

termes de durée des flammes. Plus l’os est fracturé, sec et peu dense, plus la durée de la combustion est faible. L’influence de l’humidité est parfaitement connue pour le bois (Trabaud 1976, 1989) et agit probablement de la même manière pour l’os. La première phase de la combustion correspond à la phase d’évaporation de l’eau contenue dans l’os. Plus le taux d’humidité est élevé, plus l’entrée complète en combustion est retardée. Dans ce cas-là, on observe certes une augmentation de la durée mais cette première phase est peu active et l’énergie dégagée reste relativement faible au vu des températures enregistrées. Inversement, lorsque l’os est sec, il s’enflamme très rapidement ; la température s’élève très vite et il se consume plus rapidement. L’énergie dégagée est ainsi plus importante mais moins durable. De la même manière que la dessiccation des os, la fracturation accélère le processus de combustion en favorisant une libération plus rapide des graisses combustibles. Plus les fragments sont petits, plus la température s’élève vite, plus la combustion est active et corrélativement moins durable.

La densité du tissu spongieux joue également un rôle dans la vitesse de libération de la graisse : plus les pores sont petits, plus la vitesse est faible. Ainsi, les extrémités distales d’humérus qui ont pourtant une teneur en graisse plus faible que les extrémités proximales (Binford, 1978 ; Metcalfe, Jones, 1988) ont donné lieu, dans nos expériences, à des combustions plus durables. Comme pour les os frais, les fortes densités favorisent l’augmentation de la durée des flammes, au détriment de la capacité énergétique. La densité a par conséquent plus d’influence sur la durée des flammes alors que la teneur en graisse influe sur la capacité énergétique. Lorsque la portion spongieuse est dense, humide et entière, l’inflammation est lente ; les températures s’élèvent lentement et la phase de flamme est durable. Cette élévation de la durée augmente la puissance du combustible, c’est-à-dire sa capacité à élever la température d’un corps, mais abaisse sa capacité énergétique puisqu’une même quantité d’énergie est dégagée au cours d’une phase plus longue. Inversement, une portion spongieuse peu dense, sèche et fragmentée favorise une montée très rapide en température

mais entraîne également un refroidissement plus vélocé. La capacité énergétique de ce type de combustible est, par conséquent, plus élevée mais sa puissance plus faible que dans le cas de l'os dense, frais et entier.

La durée de calcination des os varie également en fonction de la densité du tissu spongieux, les portions les moins denses étant celles qui présentent les plus longues durées de calcination. Pour autant, cette durée reste très faible et l'essentiel des composés inflammables est mobilisé lors de la phase précédente.

L'OS ET LE BOIS ONT DES PROPRIÉTÉS DISTINCTES

Nos expériences permettent de proposer une comparaison entre la combustion de l'os et celle du bois. À masse équivalente, l'os offre une durée de combustion moyenne avec flammes légèrement supérieure à celle du bois ; par ailleurs la durée augmente de façon exponentielle avec la masse alors que c'est l'inverse pour le bois : l'entretien d'un feu d'os est donc plus rentable, en termes de quantité de combustible à employer, que celui d'un feu de bois. Cette différence entre l'os et le bois est encore plus significative si l'on ne considère que les extrémités distales fraîches et entières.

La différence entre ces deux combustibles est plus sensible encore si l'on considère la pyrolyse sans flammes. Pour l'os, cette phase ne représente que 10 % de celle d'une masse équivalente de bois si l'on considère toutes les extrémités et 16 % si l'on considère uniquement les extrémités proximales dont la durée est supérieure à celle des distales. L'intérêt de la combustion de l'os est très faible pendant la calcination, tant du point de vue de la durée que des températures, ce qui laisse à penser que son emploi n'était pas approprié pour l'entretien du feu ou toutes fonctions nécessitant la présence de chaleur sans flammes (braises) (voir p. 242, fig. 7a).

Enfin, dans un foyer ouvert, les températures maximales dépendent plus de la masse des combustibles que de leur nature. De ce point de vue, les variations observées entre l'os et le bois ne sont pas très importantes. Des foyers alimentés par l'un ou l'autre de ces combustibles sont caractérisés par des températures moyennes de l'ordre de 400 °C, températures largement suffisantes pour répondre à des besoins énergétiques de base (cuisson, chauffage, éclairage, etc.). Pour des besoins plus spécifiques, liés à l'artisanat par exemple, il est beaucoup plus efficace de modifier la structure de combustion en adoptant une structure fermée

(four) – qui permet d'élever beaucoup plus significativement les températures, jusqu'à 1 500 °C dans certains cas – que d'augmenter la masse de combustibles brûlés.

LA FONCTION DES FOYERS EST UN ÉLÉMENT DE CHOIX DU COMBUSTIBLE

D'une manière générale, il est plus intéressant de s'interroger sur les propriétés d'un combustible en termes de fonction et de fonctionnement des foyers qu'en termes de bon ou de mauvais combustible. La palette des activités liées au feu est somme toute assez vaste, y compris pour les sites de la Préhistoire, et les énergies mises en jeu doivent être suffisamment variées pour répondre à l'ensemble des besoins. La nature du combustible employé permet de moduler les caractéristiques thermiques de la combustion mais il faut également prendre en compte la variabilité des formes que le combustible peut revêtir. Pour le bois, chacun sait apprécier la variabilité du comportement au feu due à l'espèce, au calibre des branches mais aussi à leur humidité et aux altérations. Nos résultats montrent que de la même manière, les propriétés combustibles de l'os varient beaucoup selon qu'il s'agit des extrémités distales ou proximales, qu'elles sont fraîches ou sèches et enfin selon qu'elles ont été fracturées ou non avant la combustion. Il convient donc de mettre en parallèle les parties osseuses et les activités auxquelles elles peuvent répondre, en termes thermiques.

En premier lieu, il convient de rappeler que l'emploi de l'os ne peut se substituer totalement à celui du bois ; ce combustible est uniquement approprié aux activités liées à la présence de flammes puisqu'une fois les dernières flammes éteintes le foyer se refroidit très rapidement. Pour les activités liées à la pyrolyse sans flammes, qui vont du simple entretien du feu au traitement thermique du silex en passant par la cuisson indirecte d'aliments sur pierre ou galets, ou celles nécessitant une puissance importante, c'est-à-dire une chaleur élevée, supérieure à 400 °C pendant plusieurs heures (plus de 2 heures), il est toujours préférable d'utiliser du bois dont la phase de calcination est dix fois supérieure à celle de l'os, ou du charbon, dont l'utilisation par les Moustériens de l'abri des Canalettes (Nant, Aveyron) a été mise en évidence (Théry *et al.* 1995, 1996 ; Théry-Parisot, Meignen, 2000).

Inversement, les activités associées à la combustion vive peuvent tout à fait être réalisées avec de l'os spongieux. Pour toutes les activités qui s'inscrivent dans la durée, comme l'éclairage, le séchage, le fumage et la cuisson des

aliments, la protection, l'entretien d'un petit foyer domestique, il convient d'employer du spongieux frais et entier, de préférence des extrémités distales. En revanche, si l'on souhaite maintenir à la fois une combustion vive et des températures élevées sur la durée, il faut alimenter constamment le feu en petits éléments secs (chauffage, cuissons ou traitement thermiques). Dans un souci d'économie, il est préférable d'employer des os puisque, à durée équivalente, la masse d'os nécessaire est inférieure à celle de bois.

Il est également possible de réguler la production des fumées en jouant sur l'état de fraîcheur des os. Ainsi, la combustion des portions fraîches produit des fumées humides, ce qui convient par exemple pour le traitement des peaux. Lors de la chaîne opératoire, celles-ci doivent être exposées pendant quelques minutes à ces fumées (Beyries, 2002). De la même manière le façonnage des objets en bois doit être réalisé au-dessus de fumées humides. L'association humidité et chaleur permet de ramollir la lignine contenue dans les fibres et de repousser la limite d'élasticité du matériau qui peut ainsi être mis en flexion sans se briser.

Ainsi, la gamme des possibilités d'adaptation du combustible osseux aux différentes fonctions des foyers est relativement large, si l'on exclut toutes les activités qui s'inscrivent dans la durée ou celles qui nécessitent la présence d'une active phase de calcination.

DISCUSSION

Ces expériences ont permis de montrer que l'os spongieux présente des qualités combustibles indéniables qui sont pour partie meilleures que celles du bois. La mise en évidence de ces propriétés confirme l'hypothèse d'un emploi préférentiel de ces portions dans certains sites, hypothèse qui ne reposait jusqu'alors que sur leur seule présence. Plus encore, ces résultats permettent de mieux cerner les motivations qui ont présidé à leur utilisation et d'en discuter les modalités.

L'emploi de l'os est souvent interprété comme une réponse des groupes du Paléolithique à une pénurie de bois. Selon nous, cette hypothèse doit être reconsidérée en prenant en compte tant les propriétés de l'os que la spécificité des occupations du Paléolithique en termes de durée. Cette nouvelle hypothèse, qui n'est pas exclusive, repose sur deux arguments principalement : d'une part, l'usage de l'os ne peut répondre à l'ensemble des besoins énergétiques requis sur un site d'habitat ; et, d'autre part, l'os n'est pas

plus abondant que le bois même dans un milieu pauvre. Son emploi ne peut donc répondre qu'à des besoins particuliers et/ou limités en combustible.

LE COMBUSTIBLE OSSEUX NE PEUT RÉPONDRE À L'ENSEMBLE DES BESOINS ÉNERGÉTIQUES

Le premier argument repose sur la spécificité même de la combustion de l'os. Nous avons vu que ses propriétés combustibles, si elles sont indéniables, ne peuvent répondre à l'ensemble des besoins énergétiques puisqu'en pratique toutes les activités liées à la pyrolyse sans flammes sont difficiles à mettre en œuvre avec ce combustible qui s'éteint très rapidement (près de 10 fois moins durable que le bois). Or, dans un site de type camp de base, tous les pôles d'activités sont représentés et pour bon nombre d'entre elles, l'emploi d'os ne pourrait se substituer à celui du bois. C'est ici la première des limitations d'une utilisation exclusive de l'os comme combustible et, à notre sens, elle n'est pas négligeable. Dans un tel site, si l'emploi de l'os peut trouver sa justification pour des fonctions précises, il ne peut être qu'un combustible d'appoint associé à d'autres dont les propriétés sont complémentaires. Il est par conséquent peu probable qu'un site dans lequel l'os est le seul combustible utilisé soit un site d'occupation durable. Inversement, un site d'occupation ponctuelle dans lequel les activités seraient très spécialisées ou moins diversifiées pourrait expliquer l'emploi exclusif d'os. En revanche, la présence concomitante de deux ou de plusieurs combustibles peut traduire une gestion réfléchie de chacun d'entre eux, au regard de leurs propriétés et de leur complémentarité. Mais il peut autant s'agir de sites dits d'habitat que de site d'occupation ponctuelle dans lesquels les activités peuvent également être diversifiées. Ce propos peut être illustré par deux exemples. Dans le site moutérien des Canalettes (Nant, Aveyron) interprété comme un site d'habitat (Meignen, 1993), du charbon fossile et du bois ont été simultanément utilisés (Théry-Parisot, Meignen, 2000). Mais on trouve également l'emploi de deux combustibles (ici de l'os et du bois) dans l'abri moustérien de La Combette qui serait, au vu de l'ensemble des études menées sur ce site, une halte de chasse (Texier *et al.*, 2005).

L'OS N'EST PAS PLUS ABONDANT QUE LE BOIS

Le second argument qui, selon nous, montre que l'emploi exclusif de l'os est intimement lié à la durée

d'occupation des sites repose sur la notion d'accessibilité et de disponibilité des combustibles.

Dans un site d'occupation ponctuelle, l'emploi de bois d'abattage n'est pas envisageable car le temps de séchage est beaucoup trop long (6 mois minimum) et les besoins immédiats. Cette immédiateté des besoins peut orienter la collecte vers le bois de ramassage (bois mort ou bois flotté) mais également favoriser l'emploi de l'os déjà disponible sur le site en tant que résidus alimentaires (Théry-Parisot, 2001, 2002b, 2002c). Cette facilité d'utilisation, cette disponibilité immédiate et sans effort ne doit pas masquer la principale limite de cette pratique : le stock d'os disponible et exploitable en tant que combustible (parties spongieuses exclusivement) n'est pas illimité et est surtout moins élevé que la masse de bois, y compris dans un milieu qualifié de pauvre.

D'abord, les notions d'abondance et de pénurie de bois doivent être utilisées avec précaution car elles sont intimement liées à celles de la durée d'occupation du site et des besoins énergétiques des groupes : un milieu très pauvre en bois peut être un milieu d'abondance pour un petit groupe de chasseurs très mobiles. Lorsque l'on considère les besoins énergétiques d'un groupe semi-nomade, même dans un contexte de ramassage exclusif du bois mort, qui est d'autant plus rare que le milieu est pauvre en bois sur pied, l'aire de collecte reste modeste (Théry-Parisot, 2002a). Pour documenter cette argumentation, nous avons simulé la consommation en bois de la population du vallon de Castel-Merle (Dordogne) qui compte 6 sites aurignaciens anciens d'occupation contemporaine probable (Castanet, Blanchard, La Souquette, Labattut, Roc de l'Acier et Reverdit) et dont l'environnement végétal est connu grâce à diverses analyses anthracologiques et polliniques (Paquereau, 1970, 1976a, 1976b, 1977 ; Leroyer, 1987, 1988, 1993 ; Leroyer, Leroi-Gourhan, 1993 ; Théry-Parisot, Castel et Leroyer, à paraître). Les espèces identifiées, Pin sylvestre, Genévrier commun, Nerprun des Alpes, Saules et Bouleaux nains, sont caractéristiques de paysages ouverts et d'une végétation rase développée sous des conditions froides et sèches. Elles sont en accord avec les autres données paléoenvironnementales et confirment que l'installation des premiers Aurignaciens dans cette région est synchrone d'un épisode froid et sec de la dernière glaciation.

Le calcul de l'aire de prélèvement en bois, qui repose sur la quantification théorique des besoins d'une part et l'estimation de la biomasse végétale disponible d'autre part, montre que, même en considérant une occupation intense et répétée chaque année du vallon au cours de

l'Aurignacien ancien, l'aire maximale d'approvisionnement en bois n'excède pas un rayon de 3 000 m autour du vallon (fig. 13). Il s'agit de faibles distances en regard de celles parcourues pour la collecte des autres matières premières et l'hypothèse d'une pénurie de bois au sens strict semble difficile à soutenir³ (Théry-Parisot, à paraître).

De plus, il n'est pas tout à fait raisonnable de penser que l'os a pu être plus abondant que le bois. En effet, si l'on fait le calcul pour une seule journée, le fonctionnement de trois foyers composés à part égale d'os et de bois pendant six heures nécessiterait l'emploi de 40 kg d'os, soit quatre carcasses de 40 à 60 kg. Cette évaluation, qui repose sur des besoins somme toute assez modestes, montre que l'utilisation systématique de l'os pour la combustion conduirait rapidement à une situation absurde qui consisterait à chasser pour se chauffer ! Dans tous les cas, il ne peut donc s'agir que d'une réponse ponctuelle à un manque de bois mais jamais d'une utilisation intense et exclusive sur la longue durée.

*
* *

La moindre polyvalence du combustible osseux ainsi que sa faible disponibilité nous conduisent à préciser les conditions de son usage.

Dans les sites de type camp de base, son emploi ne pouvait être que concomitant à celui d'autres combustibles aux propriétés plus polyvalentes ou complémentaires ; il était peut-être réservé aux activités intimement liées à la présence de flammes, tout en constituant un moyen avantageux d'éliminer les résidus de l'alimentation.

Dans les sites d'occupation ponctuelle, caractérisés par des activités spécialisées, telle qu'une halte de chasse, un site de boucherie ou d'approvisionnement en matières premières diverses, son utilisation pouvait être une réponse plus immédiate que le bois d'abattage et moins contraignante, en termes d'acquisition, que le bois de ramassage et ce d'autant plus que le milieu était pauvre en taxons ligneux. Les faibles besoins énergétiques pouvaient ainsi être satisfaits en quasi-totalité par l'emploi des ossements. Ce combustible pouvait précisément être recherché pour ses propriétés répondant à des fonctions spécialisées de foyers comme le fumage de la viande par exemple.

3. Calculs basés sur le fonctionnement concomitant de 60 foyers, dix-huit heures par jour, dans un milieu de type toundra comportant 1 tonne de bois par hectare dont 469 kg de bois mort, données ONF et Duvigneaud, 1980.

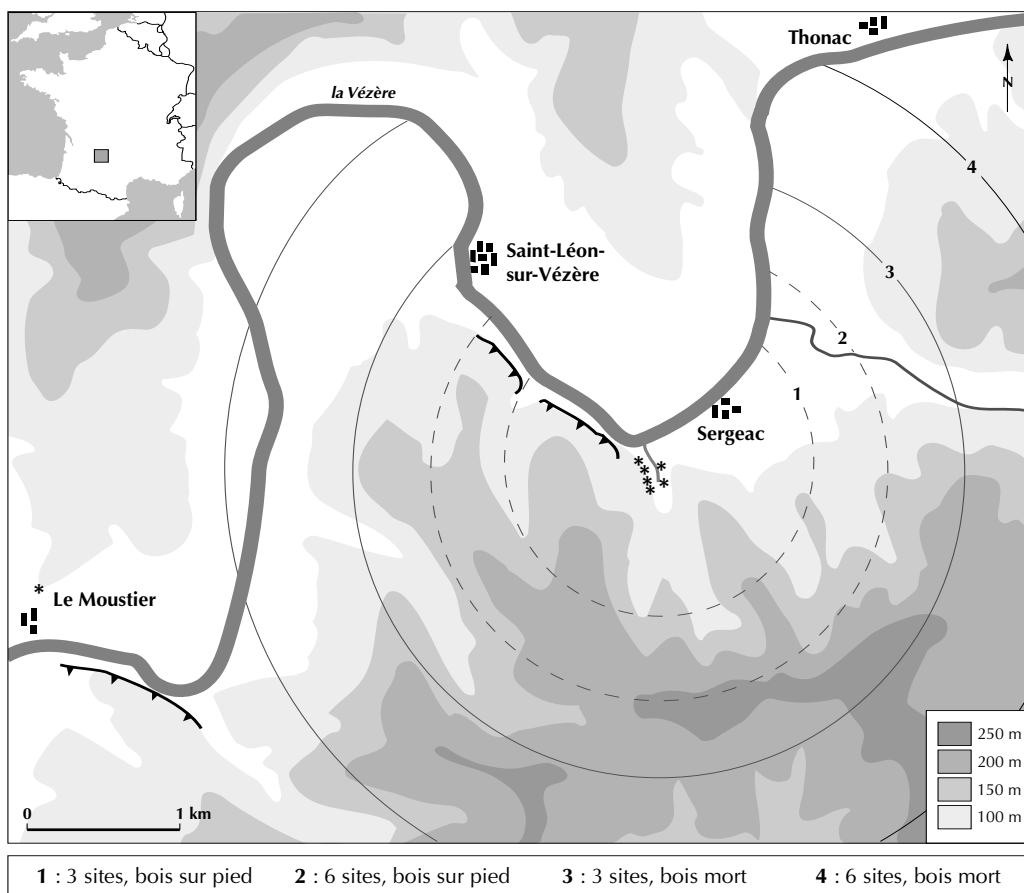


Fig. 13 – Aires optimales d'approvisionnement en bois dans le vallon de Castel-Merle.

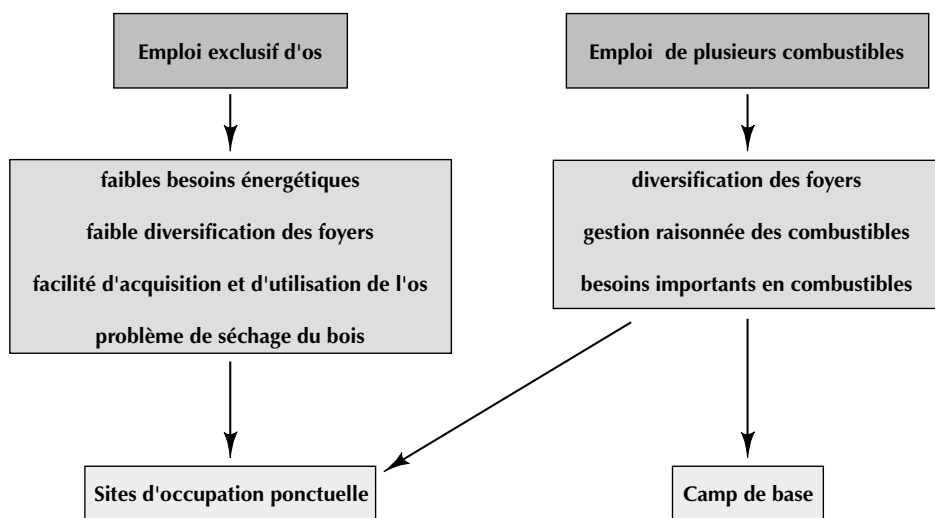


Fig. 14 – Relation entre la fonction des sites et la gestion des combustibles.

Ainsi, en contexte archéologique, la nature des combustibles identifiés semble pouvoir documenter la durée d'occupation et, par extension, la fonction des sites du Paléolithique. Pour peu que la question de la conservation différentielle des restes brûlés ait été posée, la présence exclusive de combustible osseux témoignerait d'une occupation brève du site concerné. Inversement, l'emploi de bois seul, dont la gamme des propriétés est plus large, ou l'emploi concomitant de plusieurs combustibles relèverait d'avantage d'une gestion polyvalente des foyers en relation avec une occupation plus « durable » du site mais n'exclut pas l'hypothèse d'une occupation ponctuelle pour laquelle les activités peuvent tout autant être diversifiées (fig. 14).

C'est en étudiant de manière très précise les gisements dans lesquels l'os a été utilisé comme combustible et en intégrant l'ensemble des données spécifiques à ces sites, les données environnementales et taphonomiques, qu'il sera possible d'établir avec plus de précisions la nature de la relation entre la gestion des combustibles et la fonction des sites du Paléolithique.

Remerciements

Nous tenons à remercier Jean-Philip Brugal (UMR 6636 du CNRS, Maison méditerranéenne des sciences de l'Homme) et Philippe Fosse (UMR 5608 du CNRS, Unité toulousaine d'archéologie et d'histoire) pour leur participation à la préparation des expériences et à l'interprétation des résultats.

BIBLIOGRAPHIE

ALBERT R.-M., LAVI O., ESTROFF S., WEINER S., TSASTKIN A., RONEN S., LEV-YADUN S.

1999 : « Mode of occupation of Tabun Cave, Mont Carmel, Israel, during the Mousterian period : a study of the plant material used for fuel and other purposes », *Journal of Archaeological Science*, 27, p. 931-947.

ALBERT R.-M., WEINER S., BAR-YOSSEF O., MEIGNEN L.

2000 : « Phytoliths in the Middle Palaeolithic deposits of Kebara Cave (Mont Carmel, Israel) : study of the plant materials used for fuel and other purposes », *Journal of Archaeological Science*, 29, p. 1249-1260.

ALIX C.

1998 : « Provenance et circulation des bois en milieu arctique : quels choix pour les Thuléens ? » *Revue d'archéométrie*, 22, p. 11-22.

ALIX C., BREWSTER K.

2005 : « Not all driftwood is created equal : wood use and value along the Yukon and Kuskokwim rivers, Alaska », *Alaska Journal of Anthropology*, 2, 1, p. 2-19.

BEYRIES S.

2002 : « Le travail du cuir chez les Tcouktches et les Athapaskans », in AUDOUIN-ROUZEAU F., BEYRIES S. (DIR.), *Le travail du cuir de la Préhistoire à nos jours, Actes des XXIF rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 18-20 oct. 2001*, Antibes, éd. APDCA, p. 143-157.

BINFORD L. R.

1978 : *Nunamiut Ethnoarchaeology*, New York, Academic Press, 504 p.

BOMBAIL C.

1987 : *Les structures de combustion des niveaux aurignaciens et périgordiens du Flageolet I*, mémoire de licence, univ. de Neuchâtel.

BON F., GAMBIER D., ET AL.

1998 : « Gisement de Brassempouy (Landes) : les recherches de 1995 à 1997, bilan et perspectives », *Bulletin de la Société Bourda*, 449, p. 203-222.

CAIN C. R.

2005 : « Using burned animal bone to look at Middle Stone Age occupation and

behavior », *Journal of Archaeological Science*, 32, 6, p. 873-884.

CASTEL J.-C.

1999 : *Comportements de subsistance au Solutréen et au Badegoulien d'après les faunes de Combe-Saunière (Dordogne) et du Cuzoul de Vers (Lot)*, thèse de doctorat, univ. Bordeaux-I, 619 p.

2003 : « Économie de chasse et d'exploitation de l'animal au Cuzoul de Vers (Lot) au Solutréen et au Badegoulien », *Bulletin de la Société préhistorique française*, 100, 1, p. 41-66.

CLATTENBURG G.

1975 : « Thermal properties of cancellous bone ». *Journal of Biomedical Materials Research*, 9, p. 169-182.

COSTAMAGNO S.

1999 : *Stratégies de chasse et fonction des sites au Magdalénien dans le sud de la France*. Bordeaux, thèse de doctorat, univ. Bordeaux-I, 2 t., 495 p., 329 tabl., 132 fig., 128 pl.

2000 : « Stratégies d'approvisionnement et traitement des carcasses au Magdalénien : l'exemple de Moulin-Neuf (Gironde) », *Paleo*, 12, p. 77-95.

COSTAMAGNO S., GRIGGO C., MOURRE V.

1998 : « Approche expérimentale d'un problème taphonomique : utilisation de combustible osseux au Paléolithique », *Préhistoire Européenne*, 13, p. 167-194.

COSTAMAGNO S., THÉRY-PARISOT I., BRUGAL J.-P., GUILBERT R.

2005 : « Taphonomic consequences of the use of bones as fuel. Experimental data and archaeological applications », in O'CONNOR T. (ÉD.) *Biosphere to Lithosphere. New Studies in Vertebrate Taphonomy. Proceeding of the 9th ICAZ Conferences of the International Council of Archaeozoology, Durham, August 2002*, Oxford, Oxbow book (Series editors : P. Rowley-Conwy, U. Albarella, K. Dobney), p. 51-62.

DUVIGNEAUD P.

1980 : *La synthèse écologique*, Paris, éd. Doin 380 p.

GILCHRIST R., MYTUM C.

1986 : « Experimental archaeology and burnt

animal bone from archaeological sites » *Circaea*, 4, 1, p. 29-38.

KNIGHT J. A.

1985 : *Differential preservation of calcined bone at the Hirundo Site, Alton, Maine*, Master Thesis, University of Maine.

LALOY J.

1981 : « Recherche d'une méthode pour l'exploitation des témoins de combustion préhistoriques », *Cahiers du Centre de recherches préhistoriques*, Université Paris-I, 7, 167 p.

LEROYER C.

1987 : « Les gisements de Quinçay et de Saint-Césaire : quelques comparaisons préliminaires des études palynologiques », in *Préhistoire de Poitou-Charentes, problèmes actuels, Actes du 111^e congrès national des Sociétés savantes. Poitiers 1986, Pré- et Protohistoire*, Paris, éd. du Comité des travaux historiques et scientifiques, p. 125-134.

1988 : « Des occupations castelperroniennes et aurignaciennes dans leur cadre chronoclimatique », in OTTE M. (ÉD.) *L'Homme de Néandertal, Actes du colloque international de Liège, 4-7 déc. 1986*, vol. 8, *La Mutation*, Liège (Études et recherches archéologiques de l'université de Liège, 35), p. 103-108.

1993 : « L'Aurignaco-Périgordien : apport de la palynologie », *Cahiers de Recherches préhistoriques*, 9. Paris, Université Paris-I, p. 3-22.

LEROYER C., LEROI-GOURHAN ARL.

1993 : « Pollen analysis at Saint-Césaire. Context of a late Neandertal. Monographs », in LÉVÊQUE F., BACKER A. M., GUILBAUD M. (ÉD.) *Context of a Late Neandertal Implications of Multidisciplinary Research for The Transition to Upper Paleolithic Adaptations at Saint-Césaire, Charente-Maritime, France*, Madison, Prehistory Press (Monographs in World Archaeology, 16), p. 59-70.

LEVI-STRAUSS C.

1962 : *La Pensée sauvage*, Paris, Plon, 389 p.

MEIGNEN L. (DIR.)

1993 : *L'Abri des Canalettes. Un habitat moustérien sur les grands Causses (Nant, Aveyron)*, Paris, CNRS Éditions (Monographie du CRA, 10), 364 p.

METCALFE D., JONES K. T.

1988 : « A reconsideration of animal-part utility indices », *American Antiquity*, 53, p. 486-504.

PAQUEREAU M.-M.

1970 : « Flores et climats paléolithiques dans le sud-ouest de la France », *Revue de géologie physique et de géologie dynamique*, XII, p. 109-116.

1976a : « Le Würm ancien en Périgord. Étude palynologique. Première partie : les diagrammes anthracologiques, la zonation climatique », *Quaternaria*, XVIII, p. 1-49.

1976b : « Le Würm ancien en Périgord. Étude palynologique. Deuxième partie : l'évolution des climats et des flores », *Quaternaria*, XVIII, p. 1-43.

1977 : « Flores et climats du Würm III dans le sud-ouest de la France », *Quaternaria*, XX, p. 123-164.

PERLÈS C.

1977 : *Préhistoire du Feu*, Paris, éd. Masson, 180 p.

SCHIEGL S., GOLDBERG P., PFRETZSCHNER H.-U., CONARD N. J.

2003 : « Paleolithic Burnt Bone Horizons from the Swabian Jura : Distinguishing between *In Situ* Fireplaces and Dumping Areas », *Geoarchaeology : an international Journal*, 18, 5, p. 542-565.

SUSINI A.

1988 : *Étude des caractéristiques biophysiques des tissus calcifiés humains (os, émail, dentine) soumis à des traitements thermiques. Applications anthropologiques et médicales*, Thèse n° 2320 de l'université de Genève.

TEXIER P.-J., BRUGAL J.-P., LEMORINI C., LOPEZ-SAEZ J., THÉRY-PARISOT I.

2005 : « La Combette Bonnieux, Vaucluse, France : a Mousterian sequence in the Luberon mountain chain, between the plains of the Durance and Calavon rivers », *Actes du colloque The Alps : envi-*

ronment and Mobility, Trento 25-27 oct. 2001. *Prehistoria Alpina*, 39, p. 70-90.

THÉRY I., GRILL J., MEIGNEN L., VERNET J.-L., MAURY J.

1995 : « First use of coal », *Nature*, 373, p. 480-481.

1996 : « Coal used at two prehistoric sites in southern France : les Canalettes (moustérien) and les Usclades (mesolithic) », *Journal of Archaeological Science*, 23, p. 509-512.

THÉRY-PARISOT I.

1998 : *Économie des combustibles et paléocologie en contexte glaciaire et périglaciaire, Paléolithique moyen et supérieur du sud de la France. Anthracologie, expérimentation, taphonomie*, thèse de doctorat, univ. Paris-I, 500 p.

2001 : *Économie des combustibles au Paléolithique. Expérimentation, anthracologie, taphonomie*, Paris, CNRS Éditions (Dossiers de documentation archéologique, 20), 196 p.

2002a : « Fuel management (bone and wood) during the lower Aurignacian in the Pataud rock shelter (Lower Palaeolithic, Les Eyzies de Tayac, Dordogne, France) : contribution of experimentation and anthracology to the study of the socio-economic behaviour », *Journal of Archaeological Science*, 29, p. 1415-1421.

2002b : « Gathering of firewood during the Palaeolithic », in THIÉBAULT S. (ÉD.), *Charcoal analysis. Methodological approaches, Palaeoecological Results and Wood Uses*. Paris, 2002, Oxford, BAR International Series, 1063, p. 243-249.

2002c : « La collecte du bois de feu au Paléolithique » *Cahier des thèmes transversaux 2000-2001*, ArScAn, 2, MAE Nanterre, p. 20-22.

à paraître : « La gestion des combustibles (bois et os) dans l'Abri Aurignacien de Castanet (Sergeac, Dordogne) », in COLLECTIF, *L'Aurignacien ancien de l'Abri Castanet (Sergeac, Dordogne) : fouilles 1994-1998*, Supplément à *Paleo*.

THÉRY-PARISOT I., BRUGAL J.-P., COSTAMAGNO S.

2004 : « Conséquences taphonomiques de l'utilisation des ossements comme combustible. Approche expérimentale », *Les Nouvelles de l'archéologie*, 95, 1, p. 9-22.

THÉRY-PARISOT I., CASTEL J.-C., LEROYER C.

à paraître : « L'environnement des Aurignaciens de l'Abri Castanet, synthèse des données de l'anthracologie, de l'archéozoologie et de la palynologie », in COLLECTIF, *L'Aurignacien ancien de l'Abri Castanet (Sergeac, Dordogne) : fouilles 1994-1998*, Supplément à *Paleo*.

THÉRY-PARISOT I., COSTAMAGNO S., BRUGAL J.-P., GUILBERT R.

sous presse : « The use of bone as fuel during the Palaeolithic, experimental study of bone combustible properties », in MULVILLE J., OUTRAM A. (ÉD.), *The Archaeology of Milk and Fats, 9th ICAZ Conferences, Durham 2002*, Oxford, Oxbow book, p. 50-59.

THÉRY-PARISOT I., MEIGNEN L.

2000 : « Économie des combustibles (bois et lignite) dans l'Abri moustérien des Canalettes », *Gallia Préhistoire*, 42, p. 45-55.

THIÉBAULT S.

1980 : « Étude critique des aires de combustion en France » mémoire de maîtrise, univ. Paris-I.

TRABAUD L.

1976 : « Inflammabilité et combustibilité des principales espèces des garrigues de la région méditerranéenne » *Ecologia Plantarum*, 11, 2, p. 117-136.

1989 : *Les feux de forêts. Mécanismes, comportements et environnement*, éd. France sélection, 278 p.

VILLA P., BON F., CASTEL J.-C.

2002 : « Fuel, fire and fireplaces in the Palaeolithic of Western Europe », *The Review of Archaeology*, 23, p. 33-42.