



**Estimer le diamètre des bois carbonisés à partir de
l'observation de la courbure des cernes de croissance des
charbons de bois archéologiques : nouvelle contribution
méthodologique Estimating the diameter of charred wood
from the observation of the curvature of the tree rings of
archaeological charcoal: a new methodological contribution**

Sandrine Paradis-Grenouillet, Christelle Belingard

► **To cite this version:**

Sandrine Paradis-Grenouillet, Christelle Belingard. Estimer le diamètre des bois carbonisés à partir de l'observation de la courbure des cernes de croissance des charbons de bois archéologiques : nouvelle contribution méthodologique Estimating the diameter of charred wood from the observation of the curvature of the tree rings of archaeological charcoal: a new methodological contribution. Archeosciences, revue d'Archéométrie, 2020, 44/2, pp.205-217. <10.4000/archeosciences.7863>. <hal-03667605>

HAL Id: hal-03667605

<https://hal.science/hal-03667605v1>

Submitted on 13 May 2022

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 CC BY 4.0 - Attribution - International License

Estimer le diamètre des bois carbonisés à partir de l'observation de la courbure des cernes de croissance des charbons de bois archéologiques : nouvelle contribution méthodologique

Estimating the diameter of charred wood from the observation of the curvature of the tree rings of archaeological charcoal: a new methodological contribution

Sandrine Paradis-Grenouillet ^{1,2} et Christelle Belingard ^{2,3}

1 Éveha, 31 rue Soyouz 87000 Limoges, sandrine.paradis@eveha.fr

2 GEOLAB/UL UMR CNRS 6042 39E rue Camille Guérin 87000 Limoges

3 Dendrochronologue indépendante, christelle.belingard@orange.fr

Résumé

Les récents développements de l'anthracologie visent à renseigner les modes de collecte du bois, les pratiques sylvicoles et la physionomie évolutive des peuplements forestiers. Parmi ces développements, l'estimation du diamètre initial des bois carbonisés à partir de l'étude des charbons résiduels occupe une place centrale. Cette approche, initialement fondée sur l'observation de la courbure des cernes, s'appuie aujourd'hui sur la mesure précise du rayon de courbure (aussi appelé distance à la moelle) à l'aide de logiciels d'analyse d'images. Pourtant, force est de constater qu'encore trop peu d'études anthracologiques mobilisent cette approche, en particulier dans le milieu de l'archéologie préventive. Les raisons invoquées sont doubles : les équipements nécessaires (caméra et logiciels d'analyse d'images) ne sont pas encore assez démocratisés et la réalisation des mesures décuple le temps analytique. Cette approche devient donc incompatible avec les contraintes économiques de l'archéologie préventive. Pour dépasser cette limite, cet article propose une adaptation de la méthode qualitative basée sur l'observation de trois classes de courbures des cernes -courbe, intermédiaire, rectiligne- en définissant les valeurs limites des bornes de chacune de ces classes. Cette adaptation repose d'abord sur l'étude systématique des courbures de cernes dans des fenêtres d'observation posées sur une cible parfaite et six sections transversales de brins de taillis vieillis de chêne (*Quercus robur* L.) et de châtaignier (*Castanea sativa* Mill.). Cette première étape conduit à l'estimation des rayons de courbure maximums de chaque classe en mm. Dans un second temps, les valeurs limites obtenues sont testées sur un corpus anthracologique issu de trois charbonnières expérimentales pour lesquelles le diamètre initial des bois a été mesuré avant la carbonisation. In fine, les valeurs limites des trois classes de courbures sont validées et pourront être mobilisées dans les études anthracologiques ultérieures.

Abstract

Recent developments of anthracology to better understand past woodland management and wood collection strategies, allow telling how landscape changed over centuries. Among these developments, a key role is occupied by the estimation of round wood diameter based on the analysis of charcoal remains. This approach, originally based on

the qualitative observation of tree-ring curves, is now based on image analysis measurement of ring-curvature. However, only a few anthracological studies are nowadays profiting from this technique, especially in rescue archaeology. In fact, round wood diameter estimation still requires expensive tools (e.g. digital cameras and programs for image analysis) and is quite time-consuming. Here I suggest an adapted qualitative model based on the observation of the three ring-curvature classes (curved, intermediate and straight) by defining their limit values. The first step of the model is based on the systematic study of tree-ring curves in observation windows with 10 and 5 mm sides on a perfect target and six cross sections of aged coppice oak (*Quercus robur* L.) and chestnut (*Castanea sativa* Mill.). This phase brings us to the estimation of the maximum curvature ray (in mm) for charcoal samples with curved tree-rings and for those with intermediate rings. The second step consists in making a number of tests on the limit values obtained by using an anthracological corpus well known: three experimental charcoal kilns for which the diameter of the wood samples contained had been made measuring before the carbonization process occurred. To conclude, the limit values of the three classes mentioned have been confirmed and can be used for future anthracological analyses.

Mots clés :

Anthracologie, courbure de cernes, diamètre initial des bois carbonisés, approche expérimentale, charbonnières, chêne, châtaignier

Key words:

Anthracology, curvature of rings, initial diameter of charred wood, experimental approach, charcoal, oak, chestnut tree

Introduction

Jusqu'à la révolution industrielle, le bois était la principale ressource énergétique des sociétés de l'Europe tempérée. Il était indispensable pour une large palette d'activités domestiques, artisanales et industrielles où il était utilisé sous différentes formes (e.g. brindilles, fagots, bûches) ou états (e.g. charbon de bois, bois mort, bois dégradé) en fonction des contraintes environnementales et techniques, des pratiques et des usages. Pour répondre à leurs besoins énergétiques, les sociétés ont mis en place des stratégies d'approvisionnement, allant de la simple collecte opportuniste, basée par exemple sur le ramassage local du bois mort, à la mise en place de véritables réseaux commerciaux terrestres ou fluviaux (Bernard, 2003 ; Blondel, 2018 ; Bourquin, 2006 ; Rackham, 1976). L'évolution des sociétés humaines et de leurs besoins énergétiques a progressivement conduit à la transformation des espaces forestiers et des paysages, ainsi qu'à la modification de la structure, de la composition et de la diversité des peuplements. Les boisements actuels sont donc hérités de ces usages et de ces pratiques pluri-séculaires voire millénaires. Leur restitution est au coeur des recherches en écologie historique au sein desquelles l'anthracologie occupe une place de choix en apportant un éclairage original sur les peuplements passés et les modalités de leur exploitation. Les apports de cette discipline reposent notamment sur l'évaluation du diamètre initial des bois mis au feu

(éléments de tiges, branches charpentières ou secondaires, brindilles etc.) mettant en lumière les pratiques et les chaînes opératoires techniques ainsi que la morphologie et la structure des boisements passés (Asouti & Austin, 2005 ; Deforce *et al.*, 2013 ; Dufraisie, 2007 ; Henry & Théry-Parisot, 2014 ; Paradis-Grenouillet *et al.*, 2015 ; Py *et al.*, 2018).

La restitution du diamètre des bois relève de la dendro-anthracologie, une branche de l'anthracologie héritée de la dendrologie, qui s'intéresse à l'observation des cernes de croissance conservés dans les charbons de bois (largeur, distance à la moelle) (Marguerie *et al.*, 2010). Ce type d'approche, fondée initialement sur l'observation macroscopique de la courbure des cernes, est réalisé dans un premier temps ponctuellement à partir de corpus préhistoriques et de charbonnières (Hillebrecht, 1982; Jacquot & Hermier, 1959; Lundström-Baudais, 1986; Salisbury & Jane, 1940). La dendro-anthracologie ne se développe que dans les années 80, notamment en France sous l'impulsion des travaux de Marguerie, 1992 et Marguerie & Hunot, 2007. Pour systématiser l'observation de la courbure des cernes dans une perspective de restitution des diamètres, ces auteurs ont créé trois classes : courbe (courbure forte), intermédiaire (courbure faible) et rectiligne (cernes horizontaux) (figure 1). La dominance de la classe courbe dans les charbons est interprétée comme le résultat d'une utilisation majoritaire de bois de petits diamètres (brindilles, branches) alors que de fortes proportions de charbons à cernes rectilignes témoignent d'un emploi de gros diamètres (troncs, branches charpentières). La principale limite de cette approche est le caractère qualitatif des résultats ne donnant pas accès à des valeurs du diamètre des bois (en mm ou en cm).

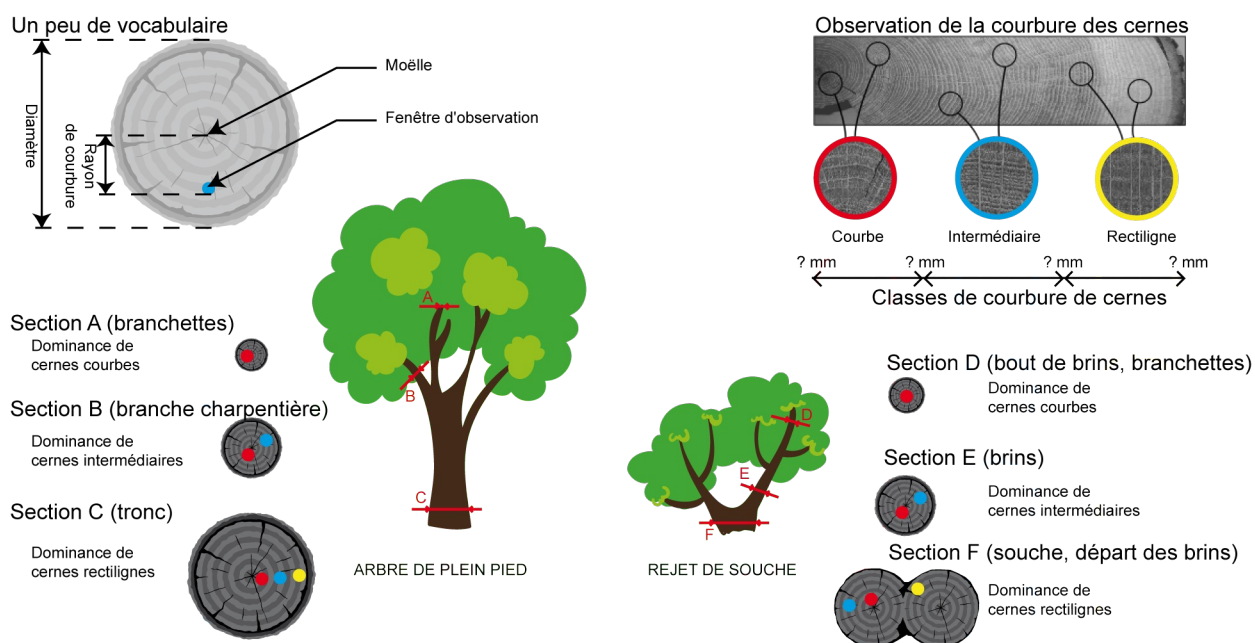


Figure 1 - *Point de vocabulaire et présentation des classes de courbure de cernes établies par Marguerie et Hunot 2007.*

Les travaux de Ludemann & Nelle, 2002, en Allemagne, ou encore ceux de Dufraisie, 2002 et 2006, en France, ont fait évoluer la méthode en proposant une évaluation de la

distance du dernier cerne conservé dans le charbon par rapport à la moelle (située au centre de l'organe, tige ou branche) en utilisant une cible parfaite graduée transparente (figure 2). Plus récemment, en mobilisant des logiciels d'analyses d'images, la mesure de la distance à la moelle est calculée à l'aide :

- de « l'outil cercle » qui consiste à positionner plusieurs points le long du ou des derniers cernes visibles pour permettre au logiciel de tracer le ou les cercles correspondant et d'en calculer le diamètre (Chravzez, 2006) ;
- de formules trigonométriques basées sur la mesure de l'angle entre deux rayons ligneux pour calculer le rayon de courbure (Dufraisse & Garcia-Martinez, 2011; Garcia-Martinez & Dufraisse, 2012; Paradis-Grenouillet *et al.*, 2010, 2013, 2018) (figure 2).

Ces mesures sont appelées « distance à la moelle » (Dufraisse, 2017) ou « rayon de courbure » (Paradis-Grenouillet *et al.* 2013) ; ce dernier terme étant choisi pour cet article (figure 1).

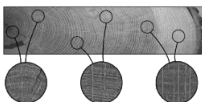
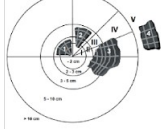

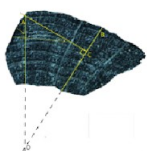
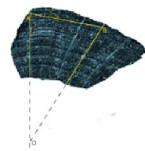
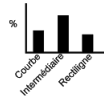
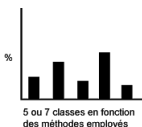
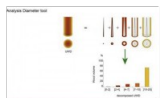
	OBSERVATION DE LA COURBURE DES CERNES		MESURE DU RAYON A L'AIDE DE LOGICIELS D'ANALYSE D'IMAGES		
	Marguerie et Hunot 2007	Ludemann et Nelle 2002	Chravzez 2006	Dufraisse <i>et al.</i> 2001, 2020	Paradis-Grenouillet <i>et al.</i> 2013
1 - Evaluer / Mesurer le rayon de courbure	<p>Estimation à l'œil de la courbure des cernes : "courbe", "intermédiaire", "rectiligne"</p> 	<p>Estimation du rayon de courbure à partir d'une cible graduée imprimée sur transparent</p> 	<p>"Outil cercle"</p> 	<p>"Trigonométrie"</p> <p>dans un triangle rectangle</p>  <p>dans un triangle isocèle</p> 	
2 - Calculer les proportions de charbons par classes de courbure de cerne	<p>Calcul des proportions de charbons (en nombre) pour les trois classes de courbure</p> 	<p>Calcul du diamètre moyen en utilisant une moyenne lissée</p> $(mD) = \frac{n1 \times 1 + n2 \times 2,5 + n3 \times 4 + n4 \times 7,5 + n5 \times 15}{N}$ <p>avec : n le nombre de fragments par classe N le nombre total de fragments étudiés et 1 ; 2,5 ; 4 ; 7,5 et 15 les centres de classes permettant la pondération</p>	<p>Calcul des proportions de charbons (en surface ou en volume) pour 5 à 7 classes.</p> 		
3 - Interpréter les résultats en diamètre des bois initiaux	<p>La dominance de la classe "rectiligne" indique l'emploi de "gros bois", la dominance de la classe courbe révèle la présence de bois de "petits diamètres"</p>	<p>Le diamètre moyen sert d'indicateur pour comparer les différents sites archéologiques étudiés</p>	<p>Interprétation des données à l'aide d'un modèle mathématique</p> 	<p>Interprétation des données par une approche comparative avec des simulations théoriques</p>	
FORCES	<p>Observations rapides sans équipements spécifiques</p>	<p>Observations rapides avec une simple cible graduée imprimée sur transparent</p>	<p>Mesure précise du rayon de courbure. Mise en évidence des mélanges éventuels de diamètre de bois</p>		
FAIBLESSES	<p>Les observations restent qualitatives empêchant une restitution précise du diamètre des bois initiaux</p>	<p>L'interprétation est basée sur une moyenne ne permettant pas de restituer les éventuelles mélanges de diamètres</p>	<p>Nécessité d'équipements spécifiques Mesure du rayon de courbure plus chronophage</p>		

Figure 2 - Présentation des différents protocoles mis en œuvre pour restituer le diamètre des bois initiaux carbonisés.

Parallèlement, ces travaux ont mis en évidence la nécessité de prendre en compte le phénomène de fragmentation liée à la carbonisation pour restituer avec plus de précision le diamètre initial des bois (Dufraisse, 2002). En effet, hormis les brindilles ou les jeunes branches dont la section transversale est souvent conservée complète (avec écorce et moelle), une pièce de bois (bûche issue d'un tronc, d'une branche, de souche, etc.) produit en général de nombreux charbons présentant des rayons de courbure variés (Dufraisse, 2002). En outre, seuls les charbons provenant des derniers cernes et ayant conservé leur écorce permettent d'approcher le diamètre initial. Les autres correspondent à une position intermédiaire quelque part entre la moelle et l'écorce. Les charbons

provenant du cœur du bois, proche de la moelle, ont donc un petit rayon de courbure alors que la section complète du bois d'où ils proviennent possède un fort diamètre.

Par exemple, avec les classes de rayon de courbure établies par Paradis-Grenouillet, 2012 (figure 3):

- une bûche de 40 mm de diamètre produit 25 % de charbons dans la classe [0-10mm], 75 % dans la classe [10-25mm] (figure 3a);
- une bûche de 200 mm de diamètre produit 1 % de charbons dans la classe [0-10mm], 5 % dans la classe [10-25mm], 19 % dans la classe [25-50mm], 56 % dans la classe [50-90mm] et 19 % dans la classe supérieure à 90 mm (figure 3b).

Lorsque ces deux mêmes bûches sont carbonisées ensemble, les deux premières classes (i.e. [0-10mm] et [10-25mm]) rassemblent tous les charbons issus de la bûche de 40 mm, mais également les charbons issus du cœur de la bûche de 200 mm. En l'absence d'écorce visible sur les charbons issus de la bûche de 40 mm, la présence de ce petit calibre ne peut donc pas être établie sauf si le processus de fragmentation est pris en considération.

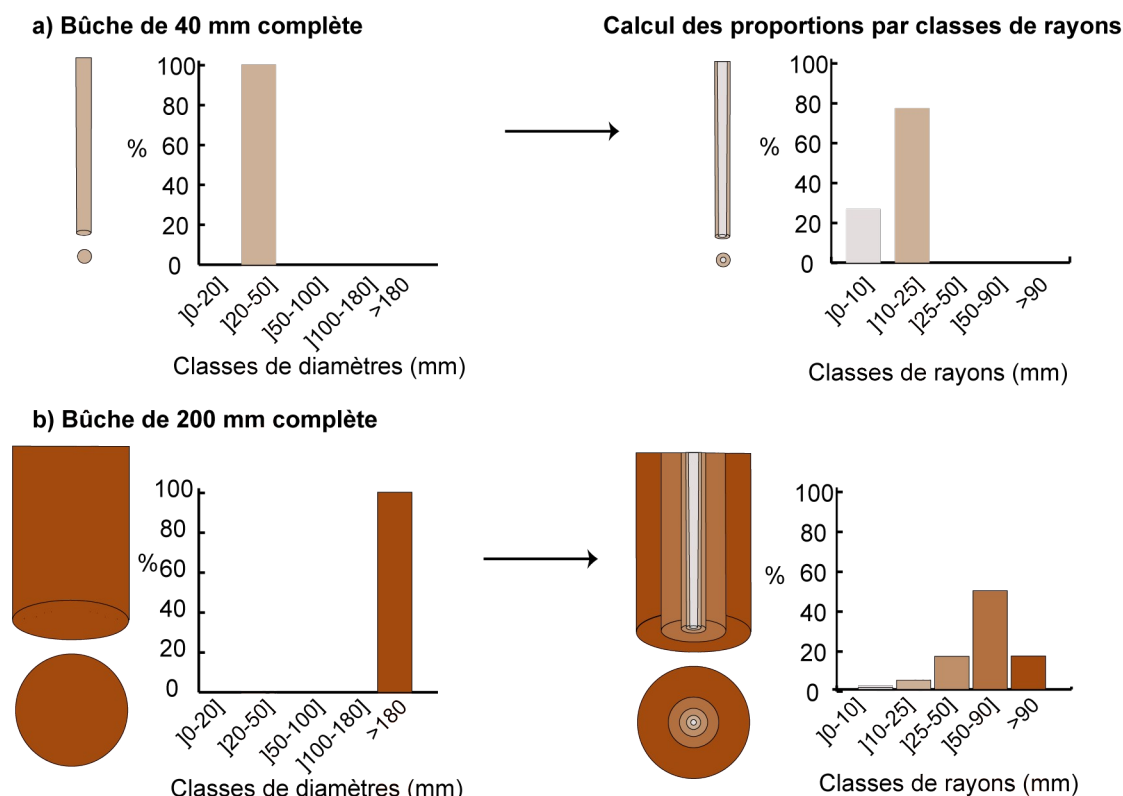


Figure 3 - Explication de de la fragmentation des bûches. a) Bûche de 40 mm de diamètre. b) Bûche de 200 mm de diamètre.

Pour répondre à cette limite d'interprétation plusieurs auteurs ont proposé des protocoles de traitement et d'interprétation des données. Certains proposent une estimation du diamètre moyen basé sur une moyenne lissée de l'ensemble des estimations obtenues sur les charbons de bois (Ludemann & Nelle, 2002; Ludemann, 2006). D'autres calculent les proportions de charbons (en nombre, en volume ou en surface) par classes de rayon

de courbure pour les comparer soit à des données acquises avec du matériel prélevé lors d'enquêtes ethno-archéologiques (Théry-Parisot, 2016), soit à des modèles mathématiques (Dufraisse, 2006; Dufraisse *et al.* 2018) ou encore à des simulations théoriques (Paradis-Grenouillet *et al.*, 2015 ; Paradis-Grenouillet, 2012).

Ces développements méthodologiques mettent en évidence la nécessité de bien décomposer l'étude du diamètre des bois initiaux en différentes étapes (figure 2) :

1. Évaluer/mesurer le rayon de courbure des derniers cernes visibles sur les charbons ;
2. Calculer les proportions (en nombre, en volume ou en surface) de charbon par classe de rayon de courbure ;
3. Interpréter les résultats en prenant en considération les processus de fragmentation des bois pour restituer les éventuels mélanges de pièce de bois de diamètres variés.

La première étape conditionne largement la mise en œuvre de cette démarche par la communauté des anthracologues. Si les méthodes employant des logiciels d'analyse d'images garantissent une excellente précision des mesures de rayons de courbure, force est de constater que trop peu d'études anthracologiques mobilisent cette approche, en particulier dans le milieu de l'archéologie préventive. Les raisons invoquées sont doubles. Les équipements nécessaires -caméra fixée sur la loupe binoculaire et logiciels d'analyse d'images- ne sont pas encore assez démocratisés et demeurent l'apanage des laboratoires de recherche académiques. De plus, la réalisation des mesures décuple le temps analytique car, pour chaque charbon étudié, il est indispensable de reproduire plusieurs fois la mesure afin d'assurer la fiabilité du résultat. Cette approche est donc très peu compatible avec les contraintes économiques de l'archéologie préventive. Pourtant, les fouilles menées dans ce cadre constituent une source importante voire exceptionnelle de matériel anthracologique et pourraient conduire à de véritables synthèses diachroniques.

Cet article propose donc d'adapter la méthode qualitative de Marguerie & Hunot 2007 pour la rendre compatible avec les modèles d'interprétation présentés ci-dessus (Dufraisse 2006 ; Dufraisse *et al.*, 2018; Paradis-Grenouillet *et al.* 2015, 2018; Théry-Parisot, 2016). Cette adaptation repose d'abord sur l'étude systématique des courbures de cernes reproduits sur une cible parfaite et de six sections transversales de brins de taillis vieillis de chêne (*Quercus robur* L.) et de châtaignier (*Castanea sativa* Mill.). Son objectif est de définir des valeurs limites en mm des bornes des trois classes de courbures. Dans un second temps, les valeurs limites obtenues sont testées sur un corpus anthracologique issu de trois charbonnières expérimentales pour lesquelles le diamètre initial des bois a été mesuré avant la carbonisation.

1 - Matériels et méthodes

1.1 - Définir des valeurs limites aux classes de courbure de cernes

Les observations de la courbure des cernes (courbe, intermédiaire, rectiligne) sont d'abord réalisées sur une cible parfaite de 300 mm de diamètre représentant des cercles concentriques espacés de 10 mm et des rayons dont les angles varient entre 2 et 180°. La cible parfaite a été réalisée à l'aide d'un logiciel de dessin (©Adobe *illustrator*) puis imprimée sur papier. Puis les observations ont été réalisées sur six sections transversales de brins de chêne et de châtaignier. Ces deux espèces ont été choisies car elles sont particulièrement présentes dans les assemblages anthracologiques du grand Sud-Ouest français (Allée *et al.*, 2009 ; Poirier, 2011), et globalement le chêne à feuillage caduc est très présent dans les corpus issus de sites archéologiques de plaines et collines (dont les étages supra- et mésoméditerranéens) et cela quelle que soit la période chronoculturelle. En outre, leur structure anatomique est identique à l'exception des rayons ligneux qui sont unisériés chez le châtaignier et à la fois unisériés et multisériés chez le chêne. Ainsi, il est aussi possible d'évaluer l'influence de la largeur des rayons sur les observations de la courbure des cernes d'essences anatomiquement très proches.

Pour chaque espèce, trois sections sont utilisées : (i) une de petit diamètre compris entre 40 et 80 mm ; (ii) une de diamètre moyen mesurant entre 150 et 200 mm, et (iii) une de diamètre compris entre 300 et 350 mm.

Deux fenêtres d'observation carrées, de 5 et 10 mm de côté, ont été découpées dans deux feuilles de papier suffisamment grandes pour couvrir la totalité de la surface de la cible et des sections transversales de bois. Ces dernières visent (i) à réduire le champ de vision de l'opérateur afin de se rapprocher des conditions analytiques anthracologiques, et (ii) de cacher l'ensemble des repères visuels (cœur, aubier, écorce) lui permettant de se situer sur une section (figure 4). Une fois la fenêtre d'étude fixée, l'opérateur définit à quelle classe de courbure correspond son observation. Pour cela, son regard se porte sur la morphologie des cernes visibles (forte courbure ou au contraire absence de courbure) ainsi que sur l'angle que forment les rayons ligneux. Ce dernier paramètre rarement explicité joue un rôle important dans l'observation. En effet, plus l'angle entre les rayons est important, plus la courbure des cernes est également importante. Au contraire, l'observation d'un angle faible entre les rayons est généralement associée à celle de cernes "rectilignes".

Ainsi, le protocole d'acquisition des données utilisé se résume ainsi :

Étape 1 : la feuille est placée sur la cible ou la section de façon aléatoire pour que l'opérateur évalue la courbure des cernes observés (figure 4.2-3) ;

Étape 2 : le dernier cerne visible (le plus externe, en direction de l'écorce) est pointé et numéroté (figure 4.4) ;

Étape 3 : la feuille est retirée et la distance entre le cerne pointé et la moelle est mesurée à l'aide d'un pied à coulisse (= rayon de courbure en mm) (figure 4.5).

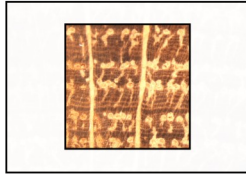
1 - Placer la cible ou la rondelle sous la loupe binoculaire



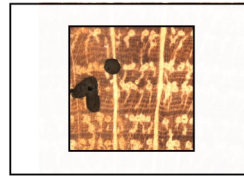
2 - Masquer la rondelle



3 - Observation de la courbure des cernes à travers les fenêtres d'observations de 5 et 10 mm



4 - Marquer le cerne observé



5 - Mesurer la distance entre le dernier cerne et la moelle à l'aide d'un pied à coulisse



Figure 4 -.Présentation des différentes étapes pour réaliser les observations

1.2 – Valider les limites de classes

Pour valider les limites de classes, nous avons eu recours à un corpus anthracologique issu de trois charbonnières expérimentales. En effet, nos précédents travaux ont mis en évidence sa très bonne représentativité pour restituer le diamètre des bois carbonisés à partir des mesures du rayon de courbure réalisées à l'aide de logiciels d'analyse d'images. Les résultats obtenus à partir des seuls charbons résiduels, prélevés après la récolte de l'essentiel de la production par les charbonniers, ont permis de discriminer les trois charbonnières (Paradis-Grenouillet, 2012; Paradis-Grenouillet *et al.*, 2018).

Ces charbonnières (A, B, C) étaient toutes composées d'un mélange similaire de bûches (entières ou refendues) de chêne, châtaignier, hêtre et charme, dont seul le diamètre variait d'une meule à l'autre. Pour le châtaignier, les bûches provenaient du tronçonnage de brins de taillis âgés de 12 ans. Les bûches de chêne, de hêtre et de charme provenaient de fûts issus d'une futaie jardinée de chênes âgés d'une cinquantaine d'années, piquetée de hêtres et de charmes de franc pied.

La première charbonnière (A) était composée uniquement de bûches entières dont le diamètre était inférieur à 100 mm. La seconde (B) comprenait uniquement des bûches, toutes refendues, de plus de 100 mm de diamètre. La troisième (C) était constituée d'un mélange de toutes les catégories de diamètres et associait des bûches entières et refendues.

L'enregistrement de la courbure des cernes a été réalisé sur l'ensemble des charbons ayant une largeur transversale supérieure à 5 mm. La surface de la coupe transversale de chaque charbon a été mesurée au pied à coulisse pour calculer les proportions de surface de chaque classe de courbure.

La comparaison des données acquises sur les charbons de bois avec les données mesurées avant la carbonisation s'appuie sur la démarche employée dans Dufraisse 2002, 2006 ; Dufraisse *et al.* 2017 ; Paradis-Grenouillet, 2012 et Paradis-Grenouillet *et al.*, 2018. Toutes les bûches employées pour construire les charbonnières ont été décomposées en trois cylindres, emboîtées les uns dans les autres, correspondant aux trois classes de courbures de cernes (figures 3 et 5).

2 - Résultats et discussions

2.1- Définition des valeurs limites des classes de courbure de cernes

L'observation de la courbure des cernes à l'aide des fenêtres d'observation a été réalisée 924 fois sur la cible parfaite et 1080 fois sur les sections de bois, i.e 580 fois sur le châtaignier et 500 fois sur le chêne.

Les données sont présentées dans des graphiques orthonormés (figure 5), montrant l'évolution des proportions de chaque classe de courbure de cernes observée en fonction du rayon de courbure mesuré. Les lignes rouges matérialisent les rayons de courbure attribués à la classe « courbe »; les lignes bleues, ceux attribués à la classe « intermédiaire », et les lignes vertes, ceux attribués à la classe « rectiligne ».

Ainsi, pour la cible parfaite avec une fenêtre d'observation de 10 mm, l'opérateur enregistre des cernes courbes dans 100 % des cas lorsque le rayon de courbure est inférieur à 30 mm. Il enregistre dans 100% des cas des cernes intermédiaires lorsque le rayon de courbure est compris entre 60 et 70 mm. Et au-delà de 120 mm, seuls des cernes rectilignes sont enregistrés (figure 5a).

La réduction de la fenêtre d'observation à 5 mm a pour conséquence un décalage de 10 mm des plages pour lesquelles l'attribution à une classe de courbure de cernes est certaine (100% des observations) (figure 5b).

Concernant les sections de chêne et de châtaignier, seuls les rayons de courbures les plus faibles et les plus forts permettent une attribution certaine (100%) aux classes de courbures de cernes « courbes » et « rectilignes ». En effet, l'attribution à la classe « intermédiaire » n'atteint pas toujours 100% des observations (Figure 5 c,d,e,f).

Ces résultats mettent en lumière des zones d'incertitude pour lesquelles l'attribution à une catégorie de courbure pose problème. Il a été choisi de considérer que le passage sous le seuil de 80 % d'attribution à une classe de courbure marque la transition vers la classe de courbure suivante.

Une fois cette condition posée, il est possible de définir les valeurs limites des trois classes de courbure de cernes. Le but étant de transposer cette méthode aux contextes

archéologiques, lesquels livrent le plus souvent des charbons ayant des plans transversaux inférieurs à un centimètre carré, les valeurs limites choisies s'appuient donc sur les résultats obtenus avec la fenêtre de 5 mm. Ainsi les cernes courbes correspondent à des rayons de courbure compris entre 0 à 30 mm ; les cernes à courbure intermédiaire à des rayons de courbure compris entre 30 et 80 mm, et les cernes rectilignes à des rayons de courbure supérieurs à 80 mm.

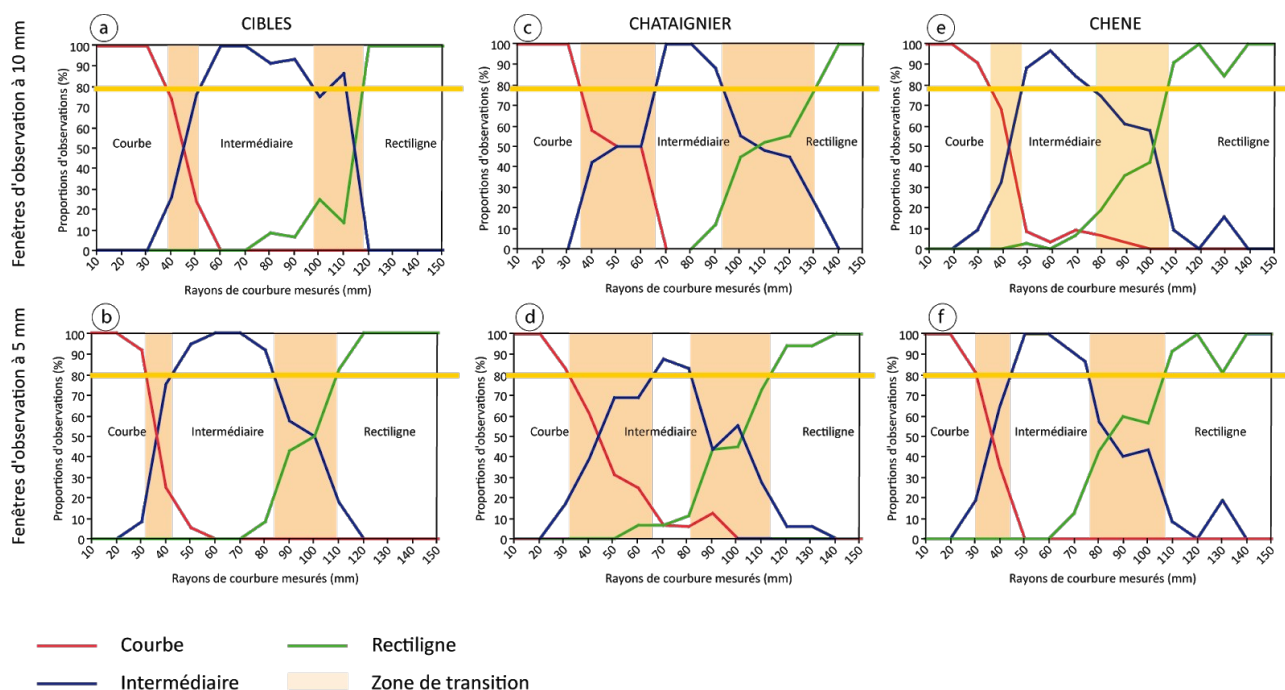


Figure 5 - Proportions d'observations attribuées à chaque classe (« courbe », « intermédiaire » et « rectiligne ») en fonction du rayon mesuré. Observations réalisées sur les cibles parfaites et sur les sections de chêne et de châtaignier avec les fenêtres de 5 mm et 10 mm de côté.

2.2 – Validation, par l'archéologie expérimentale, des valeurs limites des classes de courbure de cernes

L'observation de la courbure des cernes a été réalisée sur 339 charbons de chêne (94 pour la charbonnière A, 150 pour la B et 95 pour la C) et sur 300 charbons de châtaignier (130 pour la charbonnière A, 87 pour la B et 83 pour la C). Les charbons de hêtre et de charme, moins nombreux dans les assemblages et n'ayant pas permis l'acquisition d'un nombre suffisant d'observations de la courbure de cernes, n'ont pas été pris en considération pour la suite de cette analyse.

Les proportions de surface de charbons pour chacune des trois classes de courbure de cernes ont été établis par charbonnière et par essence permettant ainsi la comparaison avec les données mesurées avant la carbonisation. Les profils des histogrammes établis

à partir de l'analyse des charbons (en noir), sont conformes à ceux établis à partir des mesures réalisées sur les bûches avant la carbonisation (en gris).

À l'instar de nos précédents travaux (Paradis-Grenouillet, 2012 ; Paradis-Grenouillet *et al.*, 2018), la discrimination entre les trois charbonnières est graphiquement significative.

Pour le chêne comme pour le châtaignier, la charbonnière A (petits diamètres) présente des profils décroissants avec une nette dominance de la première classe de courbure de cernes. Pour la charbonnière C (mélange de diamètres), les profils des histogrammes sont décroissants pour le châtaignier, et de type uni-modal pour le chêne. Concernant la charbonnière B (gros diamètres) si les profils des histogrammes sont tous deux ascendants pour le chêne, ils sont sensiblement différents pour le châtaignier. Les mesures réalisées sur les bûches de châtaignier avant la carbonisation alimentent seulement les deux premières classes de courbure de cernes, alors que le profil obtenu à partir des charbons résiduels est de type uni-modal avec l'apparition de près de 25 % de charbons à cernes rectilignes.

Figure 6 - Comparaison des histogrammes établis à partir du diamètre des bûches avant la carbonisation (en gris) et des résultats de l'observation de la courbure de cernes effectuée sur les charbons (en noir).

Les résultats obtenus pour le chêne sont donc particulièrement conformes. Les écarts avec les données mesurées avant la carbonisation sont très faibles (moins de 10 %). Concernant le châtaignier, les écarts sont plus importants (jusqu'à 25%). L'apparition systématique de charbons à cernes rectilignes, alors que l'ensemble des bûches utilisées n'était pas supposé en produire, interpelle.

Plusieurs nouvelles pistes sont probablement à explorer.

(i) La fiabilité de l'estimation de la courbure des cernes.

En effet, cette estimation repose sur un jugement personnel de l'opérateur. Bien que les critères d'attribution à chacune des classes soient clairement énoncés (i.e. morphologie des cernes, angles entre les rayons ligneux), la différenciation entre les classes reste toujours délicate. Les données obtenues sur les cibles et les sections transversales de chêne et de châtaignier illustrent bien ce problème d'appréciation de la courbure des cernes avec la mise en lumière de zones d'incertitude au passage entre chaque classe. Ce potentiel facteur d'erreur doit être pris en considération. Pour pallier au maximum ces possibles erreurs d'appréciation de la courbure des cernes, il est souhaitable que l'opérateur étalonne régulièrement ses propres observations à partir de cibles parfaites ou de sections de bois pour lesquelles la mesure du rayon de courbure est possible.

(ii) L'influence de l'anatomie des tissus ligneux des taxons étudiés.

L'anatomie du bois pourrait également fournir des éléments de réponses. En effet, l'estimation de la courbure des cernes s'appuie sur l'observation de critères anatomiques (i.e. les rayons ligneux et la limite des cernes), si l'un de ces éléments est difficile à distinguer, l'estimation de la courbure des cernes risque d'en pâtir. Les rayons ligneux unisériés du châtaignier, moins visibles que les rayons multi-sériés du chêne, peuvent entraîner plus de difficultés à discriminer les classes de courbure « intermédiaire » et « rectiligne ». Il serait donc intéressant de poursuivre cette analyse en s'appuyant sur d'autres taxons présentant des rayons unisériés (par exemple le saule, le peuplier ou encore l'aulne) et/ou des limites de cernes peu visibles (comme par exemple la viorne et certaines espèces de la familles de Rosacées, Maloïdées).

(iii) Le rôle joué par les conditions de croissance des arbres.

Les déformations dues à la maturation du bois durant la croissance sont également à prendre en considération. L'arbre possédant un fût bien droit, dont les cernes se développeraient de manière parfaitement circulaire et concentrique, n'est qu'une représentation théorique et schématique. Les contraintes environnementales (pente, vents, avalanches etc.) comme les facteurs anthropiques (pratique sylvicoles, pacage en forêt, émondage d'arbre de plein vent etc.) impactent plus ou moins les tissus ligneux des arbres (cicatrices, bois de réaction etc.) produisant souvent des arbres au port noueux et tortueux.

Le processus de contrôle de la posture consistant au maintien de la verticalité des troncs, des brins ou encore au soutien des branches en position horizontale (comme les branches charpentières) est un facteur qui pourrait expliquer en partie l'apparition de cernes rectilignes dans les corpus anthracologiques des charbonnières expérimentales. Ce processus vital pour les arbres conduit notamment à la production de bois de réaction (souvent en grande quantité dans les branches). Au-delà du développement asymétrique des tissus ligneux dans les organes de l'arbre, le bois produit est de qualité « anormale » pouvant aller jusqu'à une déformation de la morphologie des cernes ou bien de l'orientation des rayons ligneux (Jourez, 1995, Barry Gardiner *et al.* 2014). Les bois issus des forêts de pentes ou de taillis, comme les branches se développant à l'horizontale, présentent des quantités non négligeables de bois de réaction pouvant alors affecter fortement la courbure des cernes et donc leur évaluation dans les charbons.

Dans le cadre de cette étude, si les bûches de chênes proviennent de fûts droits issus de futaie, celles en châtaignier sont toutes issues de brins de taillis âgés de 12 ans. À proximité de la souche, les brins étaient coudés sur une hauteur d'environ 500 mm ; hauteur à partir de laquelle les brins retrouvent une certaine verticalité. Malheureusement, la localisation de la moelle n'a pas été relevée avant la carbonisation (celle-ci étant généralement excentrée en présence de bois de réaction), et l'identification de bois de réaction n'a pas fait partie des critères enregistrés lors de l'analyse anthracologique. Il serait donc dorénavant intéressant, lors d'une prochaine expérimentation, de saisir ce type d'information pour évaluer si le bois de réaction peut-être à l'origine d'une sur-estimation de la courbure des cernes des charbons de bois.

(iv) L'impact des traitements du bois après l'abattage.

Enfin, il faut également prendre en considération une possible influence du traitement des bois après abattage. Les fentes d'abattage sont courantes chez les feuillus et le séchage induit également l'apparition de fentes de retrait. On peut se demander si l'apparition de fractures ne conduit pas également à une déformation de la morphologie des cernes observés dans les charbons. Un autre phénomène, bien connu pour le châtaignier, doit également être évoqué : celui de la « roulure ». Un séchage brutal (comme la carbonisation) conduit à l'apparition de nouvelles fentes, décrites comme étant « en escalier » (Bourgeois *et al.*, 2004) et conduisant à la désolidarisation des cernes de croissance. Ce phénomène de décollement d'une partie du bois pourrait-il induire une déformation de la morphologie des cernes ou encore des rayons ligneux?

Si au stade actuel de la recherche, il est impossible de définir avec certitude l'origine de l'écart constaté pour les résultats obtenus sur le châtaignier, ces quatre pistes restent à explorer pour interpréter au mieux les données acquises à partir de l'observation de la courbure des cernes.

Conclusion

La démarche méthodologique et expérimentale présentée dans cet article permet ainsi d'adapter la méthode proposée par D. Marguerie et J.-Y. Hunot, en attribuant aux classes de courbure de cernes (données qualitatives) des valeurs limites (données quantitatives). Les cernes courbes correspondent à des rayons de courbure inférieurs à 30 mm, les cernes de courbure intermédiaire à des rayons compris entre 30 et 80 mm, et les cernes rectilignes à des rayons de courbure supérieurs à 80 mm. Cette quantification des valeurs limites entre les trois classes présente un double intérêt.

(i) Les valeurs limites établies pour chaque classe permettent d'utiliser les outils et méthodes de traitement et d'interprétation évoqué en introduction (i.e. modèles mathématiques, simulations théoriques, ou encore basé sur des mesures réalisées dans le cadre d'étude ethno-archéologique) jusque-là réservés aux données résultant d'une mesure précise du rayon de courbure à l'aide des logiciels d'analyses d'images. Ainsi tout corpus anthracologique ayant permis une observation de la courbure des cernes sur plus d'une soixantaine de charbon d'un même taxon permettra l'accès à une restitution relativement précise des assemblages de bois carbonisés. Ces données viendront alors enrichir les connaissances sur les pratiques et les usages des sociétés du passé en matière de gestion du combustible (i.e. collecte opportuniste ou sélection de certaines catégories de diamètre pour répondre à des besoins spécifiques) mais également fourniront de précieux éclairages sur les boisements au sein desquels la collecte a été effectuée. Le traitement et l'interprétation des données acquises par l'estimation de la courbure des cernes nécessite une adaptation des modèles établis pour 4 ou 5 classes (Dufraisse, 2006; Paradis-Grenouillet *et al.*, 2015 ; Théry Parisot *et al.*, 2016). Il s'agit de recalculer les proportions de volume et de surface de bois théoriques pour les trois classes de courbure de cernes. Ce travail, déjà engagé au sein de l'équipe Paléoenvironnement et Géoarchéologie du laboratoire GEOLAB (UMR 6042 CNRS),

aboutira à la création d'un référentiel d'histogrammes à trois classes permettant la comparaison avec les données issues des analyses anthracologiques.

(ii) Bon nombre de contextes archéologiques ne livrent pas suffisamment de charbons ayant une section transversale de 5 mm, empêchant l'utilisation des protocoles d'interprétations présentés précédemment. Ces corpus livrent toutefois quelques charbons autorisant une estimation de la courbure des cernes. Ces données sont alors interprétées de manière plus prudente, en proposant une simple évocation du diamètre des bois carbonisés. En présence d'écorce, une estimation relativement précise peut être avancée. Par exemple un charbon présentant des cernes intermédiaires avec l'écorce encore visible témoigne de l'utilisation d'au moins une pièce de bois ayant un diamètre compris entre 6 et 16 cm de diamètre. En revanche, en l'absence d'écorce, seule une estimation à minima peut être proposée. L'identification d'un charbon à cernes intermédiaires sans écorce indique seulement une utilisation d'une pièce de bois ayant un diamètre supérieur à 6 cm.

Le développement proposé dans le cadre de cet article vient donc enrichir les possibilités d'analyses en dendro-anthracologie, offrant ainsi un outil compatible avec les contraintes budgétaires auxquelles sont soumis un grand nombre d'opérations archéologiques. De plus, la quantification des bornes des trois classes de courbures de cernes autorise dorénavant une comparaison des données obtenues par une simple estimation visuelle, avec les données issues de mesures précises à l'aide d'un analyseur d'images, offrant ainsi la possibilité à la communauté des anthracologues (issus du monde académique ou de l'archéologie préventive) de réaliser de véritables synthèses.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un partenariat entre le laboratoire GEOLAB UMR 6042 CNRS, le bureau d'études en archéologie préventive Éveha. Les auteurs souhaitent remercier l'Agence pour la Valorisation de La Recherche Universitaire du Limousin et la Région Limousin pour le financement de ce projet en 2014 et 2015, ainsi que le CNRS pour le financement accordé à travers le dispositif « accueil en UMR » pour la publication de ces résultats en 2019.

Bibliographie

Allée, P., Boumédiène, F., Rouaud, R., Delhoume, J.-P., 2009. Géoarchéologie et géohistoire des territoires forestiers limousins. Rapport PCR. SRA Limousin, Limoges.

Asouti, E., Austin, P., 2005. Reconstructing Woodland Vegetation and its Exploitation by Past Societies, based on the Analysis and Interpretation of Archaeological Wood Charcoal Macro-Remains. *Environmental Archaeology*, 10, 1 : 1-18. DOI : [10.1179/env.2005.10.1.1](https://doi.org/10.1179/env.2005.10.1.1).

Bernard, V., 2003. Stratégie d'approvisionnement en bois en Gaule du nord-ouest (du I^{er} siècle avant au IV^e siècle après J.-C.). *Revue archéologique de Picardie*, 1, 1 : 77-86. DOI : [10.3406/pica.2003.2358](https://doi.org/10.3406/pica.2003.2358).

Blondel, F., 2018. Approvisionnement et usages du bois en Auvergne, du Second âge du Fer au Moyen Âge. Thèse de doctorat, Bourgogne Franche-Comté.

Bourgeois, C., 2004. *Le châtaignier, un arbre, un bois*. Institut pour le développement forestier.

Bourquin, M.-H., 2006. *L'approvisionnement de Paris en bois de la Régence à la Révolution (1775-1789)*. Confrérie Saint-Nicolas, Clamecy, France.

Chravzez, J., 2006. Collecte du bois de fer et paléoenvironnements au paléolithique. Apport méthodologique et étude de cas : la grotte de Fumane dans les pré-alpes italiennes. Mémoire de master II. Paris I Pathéon-Sorbonne.

Deforce, K., Boeren, I., Adriaenssens, S., Bastiaens, J., De Keersmaecker, L., Haneca, K., Tys, D., Vandekerckhove, K., 2013. Selective woodland exploitation for charcoal production. A detailed analysis of charcoal kiln remains (ca. 1300–1900 AD) from Zoersel (northern Belgium). *Journal of Archaeological Science*, 40, 1 : 681-689. DOI : [10.1016/j.jas.2012.07.009](https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.07.009).

Dufraisse, A., 2002. Les habitats littoraux néolithiques des lacs de Chalain et Clairvaux (Jura, France). Collecte du bois de feu, gestion de l'espace forestier et impact sur le couvert arboréen entre 3700 et 2500 av. J.-C. : analyses anthracologiques. Thèse de doctorat, Besançon, Besançon.

Dufraisse, A., 2006. *Charcoal analysis: new analytical tools and methods for archaeology: papers from the table-ronde held in Basel 2004*. BAR. International series, ISSN 0143-3067 ; 1483. Archaeopress, Oxford.

Dufraisse, A., 2007. L'économie du bois de feu au Néolithique au nord-ouest des Alpes : constantes et déterminismes. *Annales de la Fondation Fyssen*, 21, : 27-36.

Dufraisse, A., Bardin, J., Picornell-Gelabert, L., Coubray, S., García-Martínez, M. S., Lemoine, M., Vila Moreiras, S., 2020. Pith location tool and wood diameter estimation: Validity and limits tested on seven taxa to approach the length of the missing radius on archaeological wood and charcoal fragments. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 29, : 102166. DOI : [10.1016/j.jasrep.2019.102166](https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102166).

Dufraisse, A., Coubray, S., Girardclos, O., Dupin, A., Lemoine, M., 2017. Contribution of tyloses quantification in earlywood oak vessels to archaeological charcoal analyses: Estimation of a minimum age and influences of physiological and environmental factors. *Quaternary International*, . DOI : [10.1016/j.quaint.2017.03.070](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.070).

Dufraisse, A., Coubray, S., Girardclos, O., Nocus, N., Lemoine, M., Dupouey, J.-L., Marguerie, D., 2018. Anthraco-typology as a key approach to past firewood exploitation and woodland management reconstructions. Dendrological reference dataset modelling with dendro-anthracological tools. *Quaternary International*, 463, part B : 232-249. DOI : [10.1016/j.quaint.2017.03.065](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.065).

Dufraisse, A., Garcia-Martinez, M. S., 2011. Mesurer les diamètres du bois de feu en anthracologie. *Anthropobotanica*, 02 : 1-18.

Garcia-Martinez, M. S., Dufraisse, A., 2012. Correction factors on archaeological wood diameter estimation. *Saguntum extra. Wood and charcoal : evidence for human and natural history*. E. Badal, Y. Carrion, E. Grau, M. Garcia , M. Ntinou, Valencia, Espagne.

Gardiner, B., Barnett, J., Saranpää, P., Gril, J. (dir.), 2014. *The Biology of Reaction Wood*. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. DOI : [10.1007/978-3-642-10814-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10814-3).

Henry, A., Théry-Parisot, I., 2014. Fuel use and management during the Mesolithic: recent approaches in archaeobotany/La gestion des combustibles au Mésolithique : orientations actuelles de la recherche en archéobotanique. *Des techniques aux territoires: nouveaux regards sur les cultures mésolithiques. Actes de la table-ronde, 22-23 novembre 2012, Maison de la recherche, Toulouse (France)*., 6 : article labellisé 2014 mais en cours de pagination.

Hillebrecht, M.-L., 1982. *Die Relikte der Holzkohlewirtschaft als Indikatoren für Waldnutzung und Waldentwicklung: Untersuchungen an Beispielen aus Südniedersachsen*. Göttinger geographische Abhandlungen ; Heft 79. E. Goltze, Göttingen.

Jacquot, C., Hermier, M.-C., 1959. Détermination de charbons de bois recueillis dans la grotte de Lascaux. *Comptes rendu de l'Académie des Sciences de Paris*.

Jourez, B., 1997. Le bois de tension. 1. Définition et distribution dans l'arbre. *Biotechnologie, Agronomie, Société, Environnement*, 1, 2 : 100-112.

Ludemann, T., 2006. Anthracological analysis of recent charcoal-burning in the Black forest, SW Germany. Charcoal analysis : new analytical tools and methods for archaeology. Papers from the table ronde held in Basel. *British Archaeological Report Serie 1063*, Basel.

Ludemann, T., Nelle, O., 2002. *Die Wälder am Schauinsland (Südwest-Schwarzwald) und ihre Nutzung durch Bergbau und Köhlerei*. Freiburger Forsliche Forschung.

Lundstrom-Baudais, 1986. Étude paléoethnobotanique de la station III de Clairvaux. *Les sites littoraux néolithiques de Clairvaux-les-Lacs (Jura)*. Pétrequin P.

Marguerie, D., 1992. Evolution de la végétation sous l'impact humain en Armorique du Néolithique aux périodes historiques. *Travaux du laboratoire d'Anthropologie de Rennes.*, 403 : 412.

Marguerie, D., Bernard, V., Begin, Y., Terral, J.-F., 2010. Anthracologie et dendrologie. *Dendroecology: principes, méthodes et applications*. Payette, Filion, Being (dir), Québec.

Marguerie, D., Hunot, J.-Y., 2007. Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France. *Journal of Archaeological Science*, 34, 9 : 1417-1433. DOI : [10.1016/j.jas.2006.10.032](https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.10.032).

Paradis-Grenouillet, S., 2012. Etudier les forêts métallurgiques : Analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. Exemples des forêts du mont Lozère et du Périgord Limousin. Université de Limoges, Limoges.

Paradis-Grenouillet, S., Allée, P., Servera Vives, G., Ploquin, A., 2015. Sustainable management of metallurgical forest on Mont Lozère (France) during the Early Middle Ages. *Environmental Archaeology*, . DOI : [10.1179/1749631414Y.0000000050](https://doi.org/10.1179/1749631414Y.0000000050).

Paradis-Grenouillet, S., Dufraisse, A., 2018. Deciduous oak/chestnut: Differential shrinkage of wood during charcoalification? Preliminary experimental results and implications for wood diameter study in anthracology. *Quaternary International*, 463, : 258-267. DOI : [10.1016/j.quaint.2017.06.074](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.06.074).

Paradis-Grenouillet, S., Dufraisse, A., Allee, P., 2013. Radius of curvature measurements and wood diameter: a comparison of different image analysis techniques. 4th internation meeting of anthracology in Brussels. British Archaeological Report Serie 1063, Brussels.

Paradis-Grenouillet, S., Leleu, Belingard, C., Rouaud, R., Allée, P., 2010. AnthracoLoJ, un outil pour la simplification des mesures dendrométriques. Panorama de la dendrochronologie en France. Edytem, Digne.

Paradis-Grenouillet, S., Rouaud, R., Allée, P., Leleu, J.-P., 2018. L'expérimentation sur des charbonnières en meule, une étape indispensable à la mise en place de nouveaux outils. *Charbonnage, charbonniers, charbonnières. Confluence de regards sur un artisanat méconnu*. Sandrine Paradis-Grenouillet, Sylvain Burri et Romain Rouaud.

Poirier, P. (19. .-, 2011. 15 ans d'application de l'anthracologie dans le Centre-Ouest de la France: méthodes, principaux résultats et perspectives de recherches. Bilan scientifique régional.

Py, V., Saulnier, M., Artigas, R. C., Fournou, L. F., Paradis-Grenouillet, S., Buscaino, S., Galop, D., 2018. *Chapter 10: Long-term forest evolution and woodland uses in an ancient charcoal-*

production forest of the eastern French Pyrenees: an interdisciplinary approach at high spatio-temporal resolution. Quae.

Rackham, O., 1976. *Trees and woodland in the British landscape*. J. M. Dent, London, Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord.

Salisbury, E. J., Alvin, K. L., 1940. Charcoal from Maiden Castle and their significance in relation to the vegetation and climatic conditions in prehistoric times. *Journal of Ecology*, 28 : 310-325.

Théry-Parisot, I., Chabal, L., Chravzez, J., 2010. Anthracology and taphonomy, from wood gathering to charcoal analysis. A review of the taphonomic processes modifying charcoal assemblages, in archaeological contexts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291, 1 : 142-153. DOI : [10.1016/j.palaeo.2009.09.016](https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.09.016).

Théry-Parisot, I., Henry, A., Chravzez, J., 2016. Experimentation as a tool for identifying firewood uses and management in prehistoric societies. *Cadernos do Lapaarq*, 13, 25 : 484-509. DOI : [10.15210/LEPAARQ.V13I25.7410](https://doi.org/10.15210/LEPAARQ.V13I25.7410).