# Artisanats du feu, gestion des combustibles et paléoenvironnements : de la compréhension des dépôts à l'analyse des pratiques

## Méthodes, limites et apports de l'expérimentation

Isabelle Théry-Parisot (1), Auréade Henry (1), Maxime Rageot (2)

(1)Université Côte d'Azur, CNRS, CEPAM
(2) Université de Tübingen

### 1 L'experimentation, un choix methodologique privilegié pour l'anthracologie

L'anthracologie est une spécialité de la paléobotanique dédiée à l'étude des peuplements forestiers, de leurs transformations sous l'effet du climat et des activités humaines, mais aussi des usages du bois comme combustible et comme matériau depuis la Préhistoire. L'anthracologie étudie les charbons de bois conservés dans les archives sédimentaires. La structure anatomique du bois, caractéristique des essences, est préservée après carbonisation et les taxons peuvent être identifiés en microscopie optique à réflexion.

La signature climatique des assemblages anthracologiques est décrite à partir de l'écologie* et de la phytosociologie*. L'information paléoécologique* porte sur l'environnement de proximité, à l'échelle de quelques centaines de mètres autour du site de dépôt. L'anthracologie s'intéresse également aux usages du bois comme combustible et comme matériau. La compréhension des usages et des pratiques repose sur nos connaissances des propriétés combustibles, physiques et mécaniques du bois, mais également de sa physiologie et de sa phénologie.

L'anthracologie a démontré sa pertinence en se dotant de protocoles d'échantillonnage de terrain rigoureux (Chabal et *al.*, 1999). La discipline s'est enrichie plus récemment en développant sa méthodologie à travers des expérimentations en laboratoire, garantissant la qualité et le bien-fondé des interprétations.

La première finalité de l'expérimentation est d'ordre méthodologique. Comprendre le lien entre le bois mis au feu et le dépôt de charbons de bois est un enjeu majeur pour cette spécialité dont une partie des interprétations repose sur l'analyse fine des variations de fréquence relative des taxons (Chrazvzez, *et al.* 2014 ; Dussol *et al.*, 2017 ; Théry-Parisot *et al.*, 2010 a,b). En reproduisant des situations de combustion, l'expérimentation permet de questionner la relation entre le spectre de fréquence des essences identifiées et l'assemblage originel : le spectre est-t-il le reflet du bois mis au feu en termes qualitatifs (reflète-t-il la diversité des essences brûlées ?) et quantitatifs (la proportion de chacune de ces essences est-elle respectée ?)

La création de référentiels dédiés à la compréhension des pratiques de gestion et d'utilisation des ressources combustibles est une autre finalité de l'expérimentation. Il s'agit par exemple d'identifier des marqueurs anatomiques caractéristiques de l'état du bois utilisé (*e.g.* combustion de bois vert ou altéré, calibre du bois) ou les caractéristiques du foyer lui-même (*e.g.* bilan thermique, fonction) (Henry et Théry-Parisot, 2014 ; Ludemann, 2008 ; Théry-Parisot, 2001, Théry-Parisot et Henry, 2012 ; Théry-Parisot *et al.*, 2016). Ici, la création de référentiels expérimentaux permet d'établir des comparaisons entre des lots de bois actuels dont les caractéristiques sont connues (forme, état, humidité, calibre) et des assemblages archéologiques dont on ignore la forme et l'état au moment de leur mise au feu. Enfin, d'autres expériences ont pour objectif d'étudier les artisanats du feu, mettant en jeu le bois comme combustible ou comme matière première (Osipowicz, G., 2005 ; Rageot *et al.*, 2018 Pétrequin *et al.*, 2000). Dans tous les cas, l'expérimentation permet d'enrichir notre compréhension des peuplements forestiers, des usages du bois et des activités techniques liées à l'usage du feu.

## 2 Pour une approche raisonnée de l'experimentation

Pour peu qu'elle réponde à des exigences de standardisation dont il sera question plus loin, l'expérimentation est un outil à forte valeur ajoutée pour l'anthracologie. Là où l'archéologie donne une place importante à la formulation d'hypothèses, la démarche expérimentale présente un caractère rassurant. Elle permet d'établir le lien entre nos connaissances empiriques des phénomènes et les réalités techniques auxquelles les sociétés du passé étaient confrontées. Toutefois, si la reproduction des gestes et des techniques est pour le préhistorien le meilleur moyen d'appréhender dans sa complexité l'ensemble des chaînes opératoires de production, il faut alors en mesurer toutes les limites. Il est impossible de reproduire à l'identique des situations passées ; nous n'avons ni les mêmes nécessités ni les mêmes motivations pour exécuter ces gestes. Tout au plus pouvons-nous nous suivre des protocoles rigoureux et adopter une démarche méthodologique appropriée. Mais, malgré son caractère rigoureux, l'interprétation de données quantitatives et qualitatives issues de l'expérimentation n'échappe pas au danger de la subjectivité. Un protocole inadapté ou mal préparé,

un échantillonnage orienté de la population étudiée produisent immanquablement des résultats erronés, partiels, voire partiaux. L'expérimentation n'est pas la panacée. Ce n'est pas la réponse absolue. C'est avant tout un moyen de tester des hypothèses, d'appréhender des processus, d'envisager des solutions, d'apporter des éléments de réflexion. « La méthode expérimentale, considérée en elle-même, n'est rien d'autre qu'un raisonnement à l'aide duquel nous soumettons méthodiquement nos idées à l'expérience des faits. » (Bernard, 1865, p. 26).

## 3 Matériel biologique et expérimentation : quelques pistes pour la préparation des experiénces

L'expérimentation doit répondre à des exigences de rigueur et de standardisation, seules garantes de la représentativité des résultats. Le bois n'échappe pas à cette règle. Mais la standardisation des expérimentations mettant en jeu le matériel biologique est très difficile à réaliser. D'abord, parce que le bois enregistre une forte variabilité structurelle et physico- chimique qui est à la fois intra-individuelle et inter-individuelle selon l'axe dont provient l'échantillon (rameau, branche, tronc, racine), la saison de coupe, le calibre, le taux d'humidité ou les conditions de croissances de l'arbre (sols, températures, régime hydrique...). Ensuite, parce qu'il s'agit d'un matériau fortement anisotrope*, c'est-à-dire qu'il produit une réponse directionnelle aux différentes formes de sollicitation. Pour cette raison, la préparation des lots est toujours une étape délicate, soumise aux aléas de la disponibilité de la matière première. Or, l'acquisition de la matière expérimentale issue du commerce (bois de chauffe domestique) ou de peuplements sur pied est une première contrainte de l'expérimentation. La commercialisation du bois sous sa forme « première » est principalement restreinte au bois de chauffage et ne concerne que quelques taxons, Chêne, Charme, Hêtre principalement, plus rarement Bouleau et Pin. Il est généralement déjà sec (mais on connaît rarement la date de coupe précise) et refendu, sans possibilité de sélectionner ni le calibre, ni le rang de l'axe. La sélection du bois issu de peuplements sur pied offre une plus grande souplesse pour la préparation des expériences. Néanmoins, le bois sur pied est régi par les lois du domaine, les peuplements sont protégés et lorsque l'ONF* vend des lots il n'est pas toujours possible de choisir le calibre, le rang, la saison de coupe. Dans tous les cas, le bois est vert et le temps de séchage naturel même sous abri requiert de 18 à 36 mois de stockage. Or l'humidité du bois est un facteur clé qui détermine son comportement physique, mécanique et chimique alors que le séchage est incontournable pour l'essentiel des usages. La durée du séchage reporte alors d'autant le démarrage des expériences. Le séchage en étuve est une possibilité mais cette pratique altère partiellement les constituants du bois, ce qui n'est pas sans conséquence sur son comportement au feu par exemple. La préparation des échantillons au laboratoire est ensuite une étape qui demande des moyens et du temps. La représentativité des résultats repose sur la production d'un nombre élevé d'échantillons, segments de bois bruts (bûches calibrées) ou préalablement usinés. La duplication des expériences est une autre exigence d'une expérimentation rigoureuse. Sortir de l'aléa de combustion, du hasard, pour dégager une tendance, nécessite la reproduction de chaque modalité expérimentale. Au final c'est souvent plusieurs stères de bois qu'il faut préparer et brûler. Difficile dans ces conditions de remplir

les conditions optimales d'expérimentation. Lorsqu'un lot est mal paramétré ou que l'expérience échoue pour une raison ou une autre, il n'est pas toujours possible de relancer rapidement une procédure.

### 3.1 Plan d'expérience et bases de données

Le plan d'expérience est très utilisé dans les sciences expérimentales. C'est la clé de voûte de la réussite de l'expérimentation. Il doit être mûrement réfléchi et rédigé bien en amont de l'étape de réalisation. Il doit comporter les éléments suivants :

La définition claire des objectifs de l'expérimentation (*e.g.* évaluer la fragmentation du bois lors de la combustion) ;

Les conditions de l'expérience (*e.g.* foyer ouvert/four) ;

La définition des facteurs dont on désire étudier l'influence, et de ses modalités (*e.g.* espèces, saison de coupe, calibre) ;

La définition des individus ou d'une manière plus générale, des unités expérimentales qu'on se propose d'observer (*e.g.* nombre d'échantillons par espèce ; nombre d'individus par espèce, nombre de stations d'échantillonnage, nombre de répliques d'une même modalité).

La définition des observations qui doivent être réalisées avant, pendant et après l'expérience (*e.g.* station de collecte, mesures des lots, enregistrement des températures) ;

Enfin, les informations générales relatives à l'analyse des résultats (*e.g.,* traitements mathématiques, statistiques, modélisations).

En bornant de manière très rigoureuse les contours de l'expérimentation, le plan d'expérience permet d'anticiper les problèmes organisationnels, de garantir le bon déroulement de l'expérimentation et l'interprétabilité des résultats.

A ce plan d'expérience, il faut ajouter un enregistrement rigoureux de toutes les procédures. Origine des échantillons et date d'abattage du bois sont des données qui peuvent permettre d'expliquer les résultats. C'est le cas notamment lorsque l'on compare la combustion de lots de bois abattus pendant la saison de dormance et de lots récoltés pendant la montée de sève, variables qui peuvent influer sur le déroulement de la combustion. Les caractéristiques des lots (masse, volume, calibre, présence de nœuds, densité, taux d'humidité* du bois) doivent être rigoureusement enregistrés, de même que les caractéristiques des feux eux-mêmes (composition du foyer, nombre de bûches, masse et volume du combustible, durée de la combustion, dates). La structure et le contenu de la base de données doit être réfléchie en amont et permettre un traitement facile des résultats. Elle doit comporter les variables explicatives, caractéristiques des lots, caractéristiques et enregistrements réalisés pendant la combustion (*e.g.* températures, durées), mais également les accidents ou événements non prédictibles, et bien entendu les variables mesurées (objet de l'expérimentation).

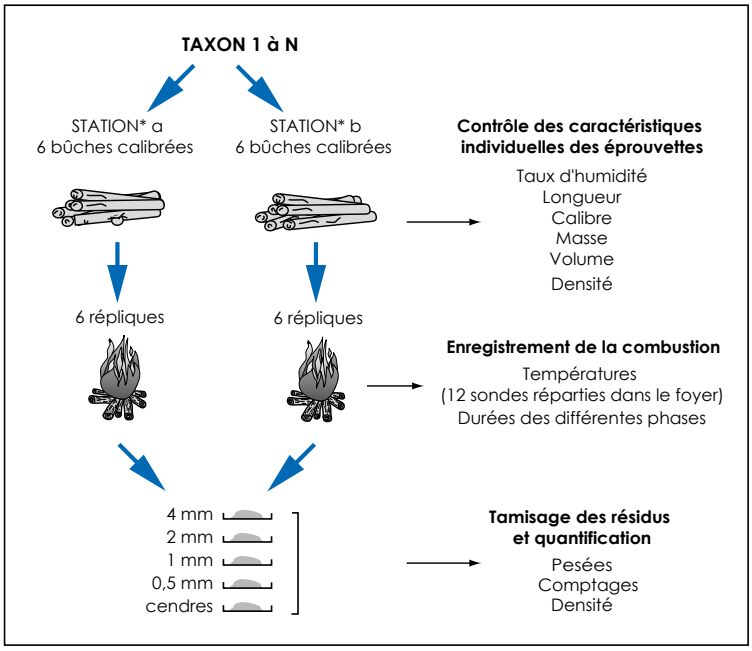
## Encart A.- Taphonomie de la combustion : Etude expérimentale des taux de résidus

### Problématique

On s'interroge sur la représentativité des essences représentées parmi les restes anthracologiques. La production de charbons de bois est-elle une fonction de l'essence, et donc source potentiel de biais de représentativité, ou est-elle indépendante du taxon ? L'expérimentation en conditions contrôlées est un bon moyen de répondre à ces questions.

### Matériel et méthode

L'expérimentation est réalisée dans un foyer de laboratoire afin de limiter l'effet avéré des paramètres climatiques sur le déroulement de la combustion. Pour chaque taxon, l'expérimentation est réalisée selon le protocole figuré ci-dessous. Les lots sont calibrés entre 8 et 12 cm de diamètre et 30 cm de Longueur ; le taux d'humidité est stabilisé à 12%. Les résultats portent sur **110 combustions**, soit 295 688 charbons de bois.



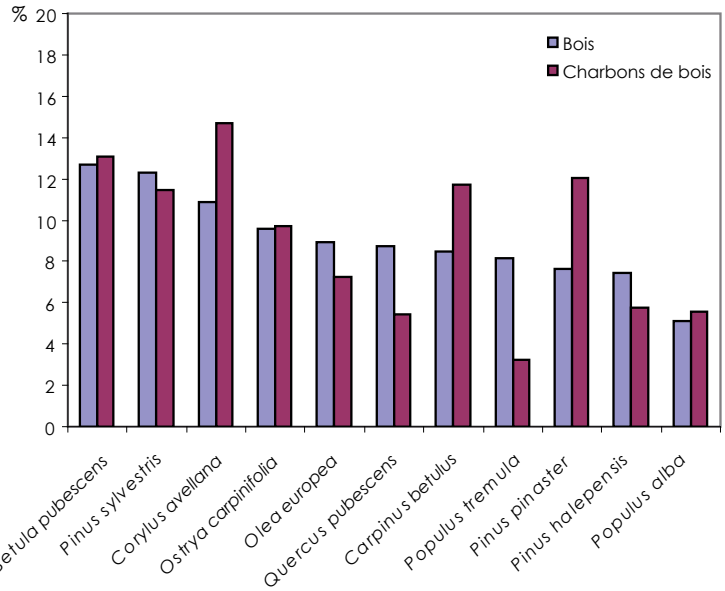

L'expérimentation porte sur onze taxons fréquemment représentés en anthracologie :

*Quercus pubescens*
*Betula pubescens*
*Olea europea*
*Corylus avellana*
*Carpinus betulus*

*Ostrya carpinifolia*
*Pinus pinaster*
*Pinus halepensis*
*Pinus sylvestris*
*Populus alba*
*Populus tremula*
*pour chaque taxon, les lots de bois proviennent de deux stations géographique distinctes afin de prendre en compte la variabilité de la croissance du bois en lien avec les conditions édaphiques locales.

**Principaux résultats**

Les résultats montrent que le rapport de proportionnalité entre les taxons est respecté pour 6 essences (différences bois/charbons $< 1\%$) : Betula, Pinus sylvestris, Pinus Halepensis, Ostrya carpinifolia, Olea, et Populus alba. Deux taxons sont légèrement sous-représentés : (1 à 4%) Quercus et Populus tremula ; trois taxons sont légèrement sur-représentés (1 à 4%) : Corylus, Carpinus et Pinus pinaster. Le traitement statistique des données montrent que le taux de résidus ne dépend pas des températures de combustion, ni des durées de la combustion, ni de la densité du bois.




**Conclusions**

L'expérimentation portant sur un grand nombre d'expériences et de résidus étudiés a permis de montrer que la représentation des essences dépend principalement de la quantité de bois mise au feu. **Les différences observées entre essences sont faibles et ne sont pas de nature à biaiser la représentativité des diagrammes anthracologiques**.

### 3.2 Prendre en compte la variabilité intra-spécifique du bois

En anthracologie on cherche souvent à étudier le comportement au feu d'un taxon, que l'on s'intéresse à la représentativité des essences, ou que l'on cherche à en comprendre l'usage. Une difficulté est alors de prendre en compte la variabilité taxinomique. La composition chimique du bois, ses caractéristiques physiques et mécaniques, sa densité, son anatomie dépendent à la fois de ses conditions de croissance (nature et type de sol, altitude, exposition), de l'âge de l'individu ou de la position de l'échantillon ou de la branche, de la saison de coupe, lesquels conditionnent ensuite le comportement au feu. Deux individus d'une même espèce peuvent avoir un comportement au feu distinct si leurs conditions de croissance diffèrent ou encore selon l'axe prélevé (présence/absence de duramen). La préparation d'expériences doit donc intégrer cette variabilité. Lorsque l'on cherche à comparer des essences ou à identifier un processus, il faut pouvoir comparer des échantillons identiques (*e.g.* même rang, même âge, même station) ou s'assurer que ces variables n'interfèrent pas avec le phénomène étudié, faute de quoi une variable cachée peut influencer les résultats. Par exemple, des expériences dédiées à l'étude de la perte de masse du bois au feu ont montré que des échantillons d'une même essence, en tous points identiques mais prélevés dans 3 stations géographiques distinctes, fournissent des résultats différents. Ici la variable « conditions de croissance » introduit une hétérogénéité des résultats supérieure à la variable « taxon » (Théry-Parisot *et al.* 2010a). Ce résultat a pu être obtenu uniquement parce que la variable « station » a été prise en compte. Mais quelle aurait été la validité des résultats montrant des différences entre taxons si nous n'avions pas tenu compte de cette variabilité ?

### 3.3 Mesurer les caractéristiques physiques du bois

#### *3.3.1 Maîtriser le taux d'humidité du bois : une contrainte majeure*

Le comportement du bois au feu dépend essentiellement de sa forme et de son hygrométrie, c'est pourquoi la standardisation de l'expérimentation nécessite le contrôle rigoureux de ces paramètres (Trabaud, 1989).

Quel que soit l'usage du bois – construction, façonnage, combustible- le taux d'humidité joue un rôle clé dans son comportement : il conditionne sa stabilité dimensionnelle, structurelle et surtout sur ses propriétés combustibles, à l'inverse de l'essence qui ne joue qu'un rôle très faible sur ces propriétés. Plus un combustible est humide et plus il faut utiliser d'énergie de ce combustible pour évacuer l'eau qu'il contient. Inflammabilité, pouvoir calorifique, températures, transfert de chaleur sont directement corrélés au taux d'humidité du bois.

C'est pourquoi il est toujours essentiel de contrôler le taux d'humidité lors de l'expérimentation, qu'elle soit dédiée à la comparaison de propriétés combustibles et/ou du taux de résidus. En premier lieu parce que, à quelques exceptions près, la combustion du bois est subordonnée à l'emploi de bois sec. Ensuite, parce qu'on ne peut comparer des propriétés du bois qu'à taux d'humidité équivalent.

Le taux d'humidité du bois peut représenter jusqu'à 80% de son poids sur brut. Il varie selon la saison, le cœur et l'aubier, les conditions environnementales ou encore

l'âge du végétal. On distingue l'eau libre ou capillaire*, qui occupe les vides cellulaires au-dessus du point de saturation* des fibres et l'eau liée ou hygroscopique présente dans les parois cellulaires où elle est liée par des forces intermoléculaires. Selon les normes NFB*, on considère que le bois est vert au-dessus du point de saturation des fibres* (30% sur sec), qu'il est mi sec ou ressuyé entre 23 et 30% d'humidité sur sec* et qu'il est sec à l'air pour H (teneur en eau) compris entre 13 et 17%.

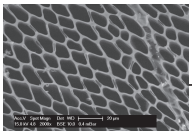
La mesure du taux d'humidité est réalisée en laboratoire grâce à un hygromètre à percussion qui permet une mesure en profondeur (mesure résistive). La régulation de l'humidité peut s'opérer par séchage naturel ou par étuvage. Le temps de séchage naturel dépend des conditions de stockage (abri/air libre), des conditions environnementales, de la saison de coupe, du calibre (un bois de gros calibre sèche plus lentement qu'un rameau), de la surface d'échange avec l'air (un bois refendu ou écorcé sèche plus vite qu'un bois rond), de la présence d'aubier (qui sèche plus vite mais retarde le séchage du cœur). En moyenne on estime qu'il faut entre 18 et 36 mois en région tempérée pour que le bois atteigne un état d'équilibre hygroscopique avec l'air ambiant. Le contrôle du séchage naturel peut aussi s'effectuer par la méthode des pesées. On considère que le bois est sec à l'air – H compris entre 13 et 17% en région tempérée – lorsque la masse d'un échantillon est stabilisée.

Un séchage plus rapide peut être obtenu par étuvage du bois à 103° C. La durée de l'étuvage dépend de la taille des échantillons. Le bois est considéré comme anhydre* après stabilisation de la masse. Il y a peu de dégradation physico-chimique. Toutefois, au-dessous du point de saturation des fibres, dans le domaine hygroscopique, les variations d'humidité s'accompagnent de variations dimensionnelles (rétractabilité) qui peuvent nuire aux résultats de l'expérimentation (*e.g.* apparition de déformations anatomiques). Autre limite, le risque de dégrader les extractibles ou « d'évaporer » les volatiles pose problème pour les expériences visant à étudier les propriétés combustibles. Enfin, l'état anhydre n'étant pas un état naturel – en séchage naturel H est compris entre 13 et 17% – il est préconisé de limiter les expériences utilisant ce procédé de séchage ou d'en connaître les limites. Un procédé plus "doux" mis au point au CIRAD* consiste à sécher le bois à basse température (60° C par exemple) ; le bois n'est pas anhydre mais son humidité est faible (quelques %), peu variable et évite une évolution sensible des extractibles, ce qui limite ou supprime les risques de fissurations.

Après séchage, le bois anhydre ou très sec se remet rapidement en équilibre hygroscopique* avec l'atmosphère ambiante (température et humidité de l'air). Il retrouve les propriétés correspondant à cet état hygrométrique (au delta près correspondant à la dégradation éventuelle des extractibles). Les conditions de stockage du bois doivent donc être rigoureusement contrôlées.

Ainsi, la réalisation d'expérimentations proches de conditions naturelles sous-tend une anticipation de la préparation des lots dont la durée dépend du séchage du bois, soit 18 mois *a minima*.

## Encart B.- Taphonomie de la combustion : Étude expérimentale de l'état de dégradation du bois

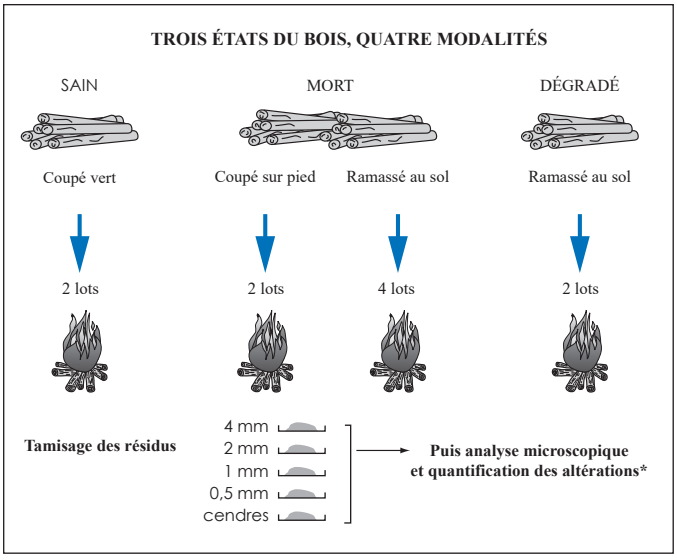


### Problématique

Le pin de type sylvestre (*Pinus type sylvestris*) est un taxon très courant dans les diagrammes anthracologiques. Les fragments de charbons de bois de cette essence affichent souvent des stigmates caractéristiques de l'attaque du bois par les champignons lignivores, survenue avant -et préservée par- la carbonisation. On s'interroge sur la possibilité de diagnostiquer l'état initial du bois utilisé dans les foyers -sain, mort, dégradé- grâce à l'étude des altérations fongiques visibles sur le matériel anthracologique.

### Matériel et méthode

Différents lots calibrés de branchages de Pinus sylvestris sont séchés en étuve afin d'abaisser leur humidité et améliorer leur inflammabilité puis traités selon le protocole ci-dessous. L'expérimentation est réalisée dans un foyer de laboratoire afin de limiter l'effet des paramètres météorologiques sur le déroulement de la combustion. Pour chaque lot, 100 à 150 résidus entre 2 et 4 mm, classe de taille fréquente au sein des charbons de bois archéologiques, est observé au microscope à réflexion. Les résultats portent sur 10 combustions pour lesquelles un total de 1250 fragments de charbons de bois a été analysé.



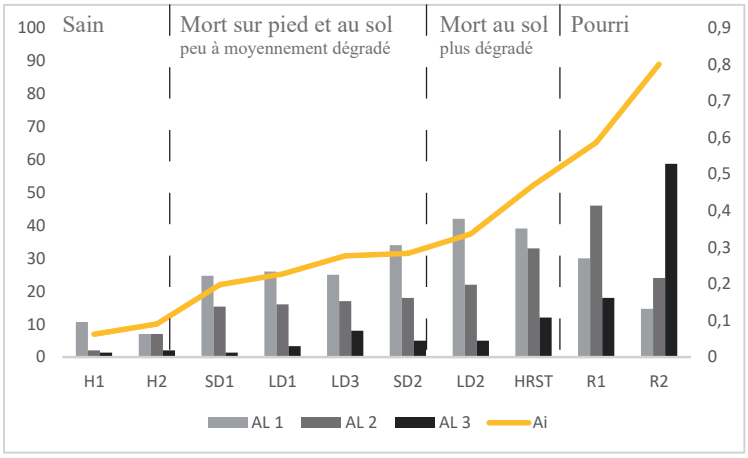
*Les stigmates dus à l'action des champignons sont soigneusement observés en coupe transversale à des grossissements compris entre 100 et 1000. Le niveau d'altération (AL) est noté pour chaque fragment selon une échelle ordinale de 0 à 3. AL0 : pas d'altération visible AL1 : cavités dans les parois cellulaires AL2 : cavités et déformations cellulaires de faible à moyenne ampleur. AL3 : déformations et/ou vides structuraux importants.

Les proportions entre les différents AL ainsi que les pourcentage de fragments altérés par lot sont calculés et synthétisés grâce à l'indice d'altération Ai=

$$\frac{(nAL1 + nAL2 \times 2 + nAL3 \times 3)}{(n\,total frags \times 3)} \quad (3)$$

**Principaux résultats**

Les résultats montrent que l'étude d'un seul fragment de charbon de bois ne permet pas de remonter à l'état initial du bois mis au feu, puisque des fragments non altérés et altérés sont présents dans chacun des lots. En revanche, leurs différentes proportions sont corrélées à l'état macroscopique du bois utilisé dans les foyers. Plus le bois est altéré, plus les proportions des niveaux d'altération moyen et fort sont importantes. En revanche, il n'est pas possible de discriminer le bois mort au sol du bois mort sur pied lorsqu'il présente la même apparence macroscopique, ce qu'illustre bien l'indice d'altération *Ai*




**Conclusions**

L'expérimentation portant sur une palette d'états d'un bois moyennement résistant aux champignons lignvores a permis de montrer que la représentation des différents niveaux d'altération, au terme de la combustion, dépend de l'état de dégradation initial du bois mis au feu. **Les différences observées entre les lots de bois de pin sylvestre sain, mort et pourri sont très significatives, ce qui permet d'appliquer cette méthode aux assemblages anthracologiques afin de discuter des modes de collecte du bois de feu en archéologie**.

### *3.3.2 Masse, volume, calibre, quelle mesure pour une standardisation des expériences ?*

Les expériences menées en laboratoire ont montré que le comportement au feu du bois est largement influencé par le calibre, le volume et le nombre de bûches. La standardisation des expériences doit donc prendre en compte ces 3 facteurs. A masse ou volume identiques, la combustion de bois refendu et de bois rond n'est pas équivalente, pas plus que la combustion d'un même volume de bois composé de branches de petits calibres ou de gros calibres. Les comparaisons ne peuvent être établies qu'entre lots de calibre et de nombre de bûches identiques. Une question importante relative à la mesure de la quantité de bois doit également être prise en compte. La masse du bois dépend de sa densité, laquelle varie d'une essence à l'autre (de 0,3 pour les bois les plus légers à 0,9 pour les plus denses en région tempérée) et de son humidité, qui peut représenter jusqu'à 80% de sa masse et varier du simple au double (un bois sec étant toujours plus léger qu'un bois vert). Il est donc toujours préférable de mesurer et de comparer des volumes de bois plutôt que des masses, même si les deux mesures sont complémentaires. De cette manière on pallie la variabilité due à la fois à la densité et au taux d'humidité du bois.

### *3.3.3 Mesurer la densité du bois et des charbons de bois*

La densité du bois est souvent une mesure utile pour la compréhension de son comportement au feu. Il existe plusieurs méthodes de mesure de la densité du bois, la plus simple étant de mesurer le rapport masse sur volume d'un échantillon usiné (de volume facile à calculer, un cube ou un cylindre par exemple), ce qui implique une standardisation du taux d'humidité du bois (*cf.* supra). Sur les charbons de bois, la mesure de la densité est plus contraignante en raison de la difficulté à mesurer le volume d'une forme non géométrique et de sa forte perméabilité qui limite les méthodes de mesure du volume par immersion. Une procédure rapide mise au point au CEPAM consiste à mesurer le volume du charbon à l'aide d'un pycnomètre* après imprégnation rapide d'un imperméabilisant (type imperméabilisant pour chaussure) permettant d'éviter l'absorption de l'eau. On applique ensuite la formule classique [1].

## 3.4 Choisir la structure de combustion

Le choix de la structure de combustion doit répondre à des exigences de conformité vis-à- vis des processus que l'on veut étudier, tout en limitant l'interférence de paramètres non contrôlables. L'expérimentation en conditions réelles est *a priori* le meilleur moyen de comprendre les processus que l'on étudie. Pourtant, s'agissant de foyers en plein air, les paramètres extrinsèques comme le vent, la pression ou l'humidité atmosphériques ont une telle importance sur le déroulement de la combustion qu'ils masquent presque complètement l'effet des variables dont on cherche à mesurer l'effet. Par exemple, la durée d'une combustion est davantage liée à l'oxygénation qu'à la taille du foyer ou au volume de combustible. Plus l'oxygénation est forte, plus la combustion est vive et le taux de résidus faible. Ici, c'est le vent qui détermine le déroulement de la combustion, sans rapport avec ce que l'on cherche à étudier. C'est

1. MC/((MPV – (MPC- MCI). MC=masse du charbon, MPV= masse du pycnomètre vide ; MPC = masse du pycnomètre avec charbon ; MCI= masse du charbon imperméabilisé ;

pourquoi il est recommandé d'utiliser un foyer de laboratoire. Ainsi, en limitant l'incidence des paramètres extrinsèques et en standardisant au maximum les expériences, il est possible d'étudier le processus de la combustion et ce, indépendamment de facteurs environnementaux.

Bien qu'il réalise des conditions éloignées des contextes naturels (usinage d'échantillons de petite taille, faible oxygénation) le four à moufle* est fréquemment utilisé pour la fabrication de référentiels [2]. Le contrôle des températures et les durées de la combustion, qui peuvent être définies comme variables de l'expérimentation, est un avantage majeur de ce type de structure. Inversement, le four à moufle tend à homogénéiser les résultats. L'échantillon est chauffé de manière homogène, ce qui n'est jamais le cas dans une structure ouverte où l'exposition à la flamme ou le contact avec les braises est aléatoire. Cette observation a été faite notamment lors d'une étude dédiée à la caractérisation de la carbonisation du bois vert et de ses effets sur la structure anatomique du bois (Théry-Parisot et Henry, 2012). Dans cette étude, les charbons de bois produits en four à moufle discriminent très nettement les échantillons verts des échantillons secs par un nombre statistiquement plus élevé de fentes de retrait sur les échantillons verts. Mais ces résultats, s'ils restent vrais, sont beaucoup moins tranchés sur les lots brûlés en foyer ouvert de laboratoire.

La représentativité des expériences réalisées en four à moufle doit donc être questionnée. De fait, les deux structures sont complémentaires et la duplication des expériences four à moufle/foyer ouvert permet de comparer les phénomènes et d'apporter davantage de précisions sur la compréhension des processus.

## Encart C.- Fabrication du brai de bouleau : approche expérimentale



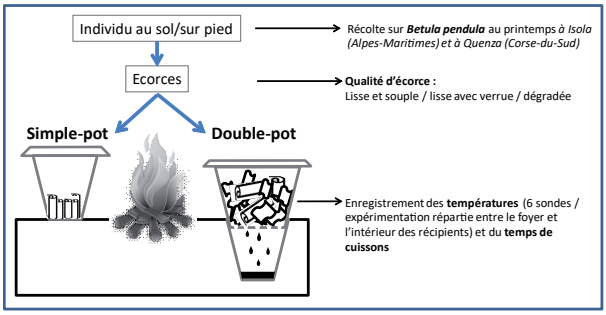
**Problématique**

On cherche à mieux comprendre les techniques de production du goudron fabriqué par traitement thermique de l'écorce de bouleau. Ce matériau, a largement été utilisé en Préhistoire notamment pour ses propriétés adhésives et hydrophobes (notamment emmanchement d'outils, réparation de récipient et étanchéïfiant). Cependant, aucun vestige archéologique ne documente les systèmes de production du brai de bouleau. L'expérimentation permet d'identifier les paramètres liés à la fabrication du matériau depuis la récolte des matières premières jusqu'aux traitements thermiques.

2. Pour la fabrication d'échantillons en four à moufle, il faut prédéfinir le gradient de montée en température (enfournement à température ou montée progressive), la température et la durée de la cuisson. Pour la préparation d'échantillons de comparaison standards (cubes ou sections de branches de 2 à 4 cm) il est préconisé de programmer une cuisson d'échantillons secs, à 500° C pendant 30 minutes.

## Matériel et méthode

Deux systèmes ont été testés : le procédé du simple-pot et celui du double-pot. L'expérimentation a été réalisée en deux temps : (i) dans un four à moufle afin de calibrer de façon précise les paramètres de montée en température puis, (ii) en foyer en plein air, plus proches des conditions réelles de fabrication. Différentes qualités d'écorce (lisse et souple, lisse à verrue, dégradée) ont été récoltées sur des individus de *Betula pendula*, faisant varier les états phénologiques et physiologiques des individus (écorce sur bois mort/ bois sur pied, juvénile à mature). Les enregistrements ont porté sur la montée en température, les durées de production et le rendement. Au total, 40 expérimentations ont été réalisées




## Principaux résultats

Les résultats montrent que la physiologie de l'arbre (individu au sol ou sur pied) n'a aucune incidence sur la production de brai de bouleau. Inversement, la qualité et la disposition de la matière première (l'écorce) dans les pots peut impacter le succès des expérimentions. En effet, seules les écorces lisses et souples, placées en rouleaux denses, permettent la production d'un matériau adhésif par le système du simple-pot, et un meilleur rendement avec le système de double-pot. Une écorce trop dégradée n'a jamais permis la production de goudron. Une chauffe contrôlée est obligatoire pour le simple-pot (entre 350°C et 420°C à l'intérieur du pot). Moins de contrôles sont nécessaires pour le double-pot. En effet, le réceptacle à goudron est enterré (maximum 300°C à l'intérieur du pot) et par conséquent protégé des températures moyennes du foyer (500°C). L'expérimentation permet d'obtenir deux brais de bouleau aux propriétés différentes. Le produit issu du procédé par simple-pot consiste en un mélange de goudron exsudé avec les restes fibreux de l'écorce ramollie par la chaleur. Il a une consistance « pâteuse» à chaud et dur à température ambiante. Le produit issue du procédé par double-pot est liquide à chaud et devient très visqueux à température ambiante. Il ne durcie pas complètement sans traitement additionnel.

## Conclusions

Le choix des matières premières (notamment la qualité de l'écorce), des traitements thermiques et des systèmes ont une incidence sur la production et probablement sur le rendement. Seule l'expérimentation permet de documenter les systèmes de production. Elle permet d'intégrer dans une réflexion globale l'exploitation, la gestion des ressources et les propriétés du matériau que l'on souhaite fabriquer. L'étude permet

également la création de matériau de références : des brais de bouleau produits selon différents paramètres. Les tests mécaniques, les tirs expérimentaux (emmanchement) ainsi que la caractérisation moléculaire de ces matériaux constituent les prochaines étapes de l'étude. L'objectif est également de mettre en lien le procédé de fabrication avec la signature chimique du brai de bouleau. Les produits finis étant jusqu'à présent les seules traces de l'exploitation de ces produits en Préhistoire, les analyses moléculaires constituent l'unique possibilité d'identifier leur nature et de remonter aux procédés de fabrication.

### 3.5 Mesurer les températures de combustion : un écueil à éviter

La mesure des températures semble a priori incontournable dans le cadre d'études expérimentales mettant en jeu la combustion. Il faut toutefois en mesurer les limites. Tous les travaux ont montré que les températures de combustion sont relativement constantes dans un foyer ouvert. En mesures réelles, elles varient dans une gamme comprise localement entre 200° C et 800° C *selon la position du capteur* dans le foyer. En moyenne, les températures de combustion sont comprises entre 300° C et 550° C, selon les conditions environnementales (vent, humidité et pression atmosphérique), la taille du foyer, le volume de bois, son taux d'humidité, son calibre (Théry-Parisot *et al.* 2010b). À l'inverse, la nature même des combustibles (essence) n'a pas d'influence sur les températures. Cette mesure n'est d'ailleurs pas utilisée par les professionnels de la combustion qui mesurent le pouvoir calorifique du bois. Si l'on étudie par exemple l'adéquation entre combustible et fonction des foyers, il est toujours plus intéressant de questionner les cinétiques de combustion (répartition de la chaleur sur la durée du feu) et les modes de transfert de chaleur (convection, rayonnement, conduction) que les températures elles-mêmes, qui sont relativement équivalentes d'un foyer à l'autre et qui sont par ailleurs 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, où les températures doivent être plus élevées ou mieux maîtrisées, il est plus efficace de modifier la structure de combustion en adoptant une structure en cuvette, qui concentre les flux thermiques et permet d'élever la température moyenne de 50° C environ, ou fermée (type four) – qui permet d'élever significativement les températures, jusqu'à 1300° C dans certains cas.

Quoi qu'il en soit, la mesure précise de températures de combustion est extrêmement délicate en structure ouverte en raison de leur très forte variabilité au sein d'un même foyer. Dans la figure 1, nous présentons un enregistrement des températures de combustion lors d'essais réalisés dans un foyer ouvert de laboratoire. Les capteurs sont répartis au sein du combustible (ici, du bois de bouleau) et enregistrent les températures pendant toute la durée de la combustion. Cette étonnante variabilité montre que l'utilisation d'un seul capteur par exemple fournirait une mesure localisée de la température complètement dépendante de la position du capteur et sans valeur pour caractériser les températures de combustion de ce foyer. Par conséquent, seule la multiplication de capteurs répartis de manière homogène dans le foyer permet un enregistrement « représentatif » de la combustion, faute de quoi les résultats ne pourraient être exploitables. On estime à 10 le nombre de capteurs minimum pour une mesure correcte des températures. Cette contrainte est moins vraie en structure

fermée, où les flux thermiques sont plus stables et les températures plus homogènes, mais reste une préconisation utile pour une validation des résultats.

En définitive, le couple temps/température détermine bien des processus et l'on ne peut considérer l'un sans l'autre. On le sait intuitivement par exemple lorsque l'on touche un objet chaud, la sensation de brûlure n'apparaît que par contact prolongé, alors que si l'on effleure simplement l'objet, on ne se brûle pas. La transformation de la matière est liée à la vitesse de propagation de la chaleur et à la chaleur elle-même. Un même état peut être obtenu en chauffant lentement à faible température ou rapidement à des températures plus élevées. Cela a été parfaitement démontré par M. Lebon dans ses travaux sur la chauffe de l'os (Lebon *et al.*, 2015), ou par M. Rageot (2016) qui a montré qu'une chauffe trop rapide ou trop lente peut faire échouer un essai de fabrication de brai de bouleau, indépendamment des températures. La mesure de la température est donc indissociable de celle des durées.

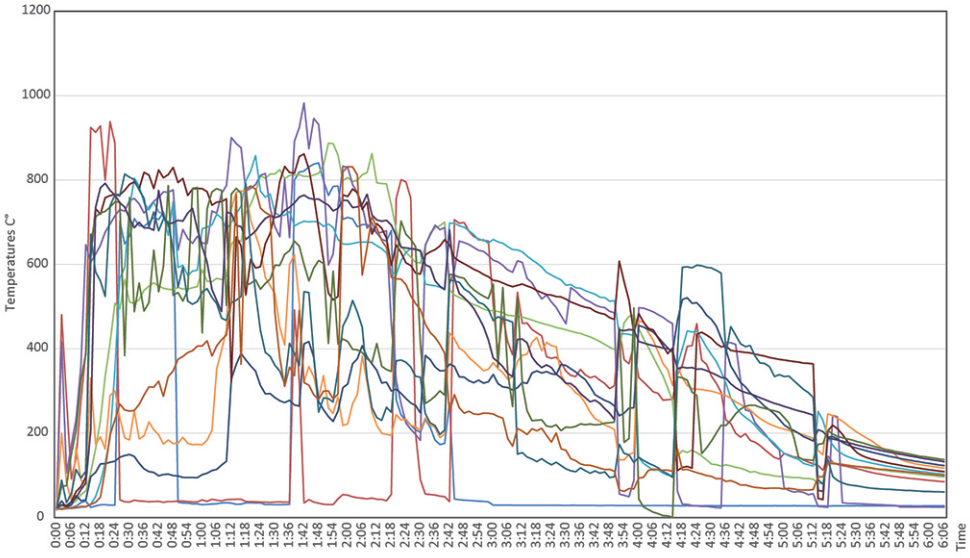



Figure 1 – Mesures en temps réel des températures enregistrées par 12 capteurs distribués dans un foyer expérimental

### 3.6 Multiplier les répliques : une exigence non négociable

Les expériences sur la combustion ont montré que la variabilité du comportement du bois au feu et celle de la combustion en elle-même sont telles qu'il est difficile de reproduire des résultats, notamment en structure ouverte. Cette forte variabilité est due à l'interaction d'une combinaison de processus mettant en jeu le bois lui-même (variabilité intra- et interindividuelle, intra- et interspécifique, morphologie, phénologie et physiologie des échantillons) et la combustion (forme et taille de la structure de combustion, paramètres extrinsèques *cf.* variables météorologiques). En matière de combustion, on ne pourra jamais démontrer un phénomène à partir des résultats de

deux ou trois essais. Dans cet exemple (encart A), nous avons étudié la fragmentation du bois sous l'effet de combustions réalisées dans un foyer de laboratoire. Nous observons très clairement une forte disparité des résultats, lesquels se stabilisent uniquement au bout de huit essais. Dans cet autre exemple (encart C), mettant en jeu la fabrication artisanale de brai de bouleau en foyer, nous avons obtenu 4 échecs et 9 réussites à partir de 13 essais identiques. Il faut donc au minimum reproduire cinq fois une même modalité expérimentale (toutes variables identiques) pour obtenir un résultat exploitable, c'est-à-dire qui n'est pas dû au hasard ou à une variable cachée de l'expérimentation. Dans tous les cas, la multiplication de variables explicatives (ou modalités expérimentales) entraîne une augmentation mathématique du nombre de répliques et complexifie l'interprétation. Il est donc préférable de procéder à une expérimentation par paliers, en ne modifiant qu'un paramètre à la fois et en testant un nombre raisonnable de combinaisons de modalités. Au-delà de deux variables explicatives, l'expérimentation est souvent trop lourde à mener et l'interprétation devient très délicate.

## 4 Conclusions

L'expérimentation repose sur un certain nombre de paramètres qui doivent être mis en place de manière rigoureuse et systématique. En effet, seules des expérimentations en conditions contrôlées bénéficiant d'un nombre satisfaisant de répliques permettent d'établir un lien entre un processus ou un phénomène et ses effets.

Dans un contexte d'interdisciplinarité de la recherche archéologique, l'expérimentation peut être considérée comme une avancée méthodologique majeure pour l'anthracologie qui permet d'aborder des questionnements bien plus larges que la seule identification taxinomique. Ces questionnements concernent aussi bien la formation que l'évolution du dépôt anthracologique et à ce titre, ils ont le potentiel de porter un éclairage nouveau sur l'interaction des facteurs naturels et humains à l'origine des foyers préhistoriques retrouvés à la fouille.

Ainsi, le développement de référentiels par l'expérimentation apporte des éléments de compréhension sur la nature des dépôts, les processus post-dépositionnels et sur la gestion du bois de feu. Par exemple, l'observation systématique de signatures anatomiques sur les charbons de bois archéologiques, couplée à l'anthracoanalyse, permet de formuler un certain nombre d'hypothèses qui portent sur les modalités d'acquisition et de gestion du bois de feu. On est notamment en mesure d'identifier des pratiques de collecte (bois d'abattage/ bois de ramassage), de discuter la fonction des foyers au regard de la nature du combustible utilisé (bois sain/ bois vert/ bois altéré) et d'apporter des éléments à la définition du statut des occupations (*e.g.* occupations brèves, sites spécialisés). Cette approche paléoéconomique visant à mettre en évidence des pratiques s'est logiquement élargie à l'étude d'autres combustibles aux propriétés spécifiques, ou encore aux artisanats du feu spécialisés, dont la réalisation nécessite une maîtrise particulière des conditions de combustion. Par exemple, les perspectives de recherche offertes par la chimie analytique nous amènent à envisager de nouvelles pistes et la prise en compte d'autres marqueurs pour la caractérisation des pratiques d'acquisition et de gestion des combustibles. Afin de pouvoir interpréter les

données archéologiques grâce aux données expérimentales, il est impératif de prendre en compte les spécificités culturelles, celles du site ainsi que l'ensemble des données contextuelles issues des disciplines archéologiques et paléoenvironnementales. Même si les interprétations restent soumises à des précautions inhérentes aux jeux de données archéologiques (*e.g.* absence de preuves, validation par convergence d'éléments congruents), l'expérimentation représente un cadre de référence solide face à la nature fragmentaire de ces données. C'est à ce cadre de référence, dont l'amélioration reste un objectif à court et moyen terme, que l'on peut confronter nos séries archéologiques et ainsi, commencer à comprendre la représentativité des dépôts anthracologiques et leur variabilité.

## Bibliographie

Chabal l., Fabre L., Terral J.F., Théry-Parisot I. (1999) – L'Anthracologie in Ferdière, A. (éd.) *La botanique*. Collection « Archéologiques », Errance, Paris, 207p.

Chrzavzez J., Théry-Parisot I., Fiorucci G., Terral J.F., Thibaut B. (2014) – Impact of post-depositional processes on charcoal fragmentation and archaeobotanical implications : experimental approach combining charcoal analysis and biomechanics. *Journal of Archeological Science* 44 : 30-42.

Dussol l., Elliot M., Théry-Parisot I. (2017) – Experimental anthracology : Evaluating the role of combustion processes in the representivity of archaeological charcoal records from tropical forests, a case study from the Maya Lowlands. *Journal of Archaeological Science* : Reports 12 (2017) 480–490

Henry A., Théry-Parisot I. (2014) – From Evenk campfires to prehistoric hearths : charcoal analysis as a tool for identifying the use of rotten wood as fuel. *Journal of Archeological Science* `http://www.sciencedirect.com/science/journal/03054403/52/supp/C52`, 321–336.

L. Chabal & S. Costamagno (eds) (2008) – The taphonomy of burned organic residues and combustion features in archaeological contexts. Proceedings of the round table, Valbonne, May 27-29, 2008. P_alethnologie_ 2 : 79-91/81-93.

Lebon M., Costamagno, S., Théry-Parisot I. (2015) – Approche expérimentales appliquées à l'étude des processus de combustion des matériaux osseux. *In* Balasse, M., Brugal, J.P., Dauphin, Y., Geigl, E.M., Oberlin, C., Reiche, I. "Message d'os", collection "Sciences Archéologiques" aux Editions Archives Contemporaines, Paris, 216p.

Ludemann T. (2008) – Experimental charcoal-burning with special regard to charcoal wood diameter analysis. In : Fiorentino, G., Magri, D. *Charcoals from the past : cultural and palaeoenvironmental implications*. BAR International Series, Lecce, p. 147-158.

Osipowicz G. (2005) – A Method of Wood Tar Production, Without the Use of Ceramics (RE)constrution and Experiment in Archaeology – European Platform, p. 11-17.

Pétrequin P., Fluzin P., Thiriot J., Benoit P. (2000) – Arts du feu et productions artisanales : actes des XXe Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 21- 22-23 octobre 1999

Rageot M. (2019) – Les substances naturelles en Méditerranée nord-occidentale (VIe-Ie Millénaire BCE) : chimie et archéologie des matériaux exploités pour leurs propriétés adhésives et hydrophobes. Thèse de Doctorat, Université de Nice Sophie Antipolis.

Rageot, M., Théry-Parisot, I., Beyries, S. et al. (2019) – Birch Bark Tar Production : Experimental and Biomolecular Approaches to the Study of a Common and Widely Used Prehistoric Adhesive. J Archaeol Method Theory 26(1), 276–312. https ://doi.org/10.1007/s10816-018-9372-4

Théry -Parisot I., Chabal L, Ntinou M., Bouby L. Carré A. (2010b) – From wood to wood charcoal : an experimental approach to combustion/ Du bois au charbon de bois, approche expérimentale de la combustion. *In* Théry-Parisot,

Théry-Parisot I., Chabal L., Chrzavzez J. (2010a) – Anthracology and taphonomy, from wood gathering to charcoal analysis. A review of the taphonomic processes modifying charcoal assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 291 : 142-153.

Théry-Parisot I., Henry A., Chrzavzez J. (2016) – Apport de l'expérimentation à la compréhension des pratiques en anthracologie : gestion et utilisation du bois de feu dans les sociétés préhistoriques". *In* Rita Scheel-Ybert, "Paisagem, subsistência e uso de plantas na arqueologia", *Cadernos do LEPAARQ*, XIII, 25.

Théry-Parisot I., Henry A. (2012) – Seasoned or green ? Radial cracks analysis as a method for identifying the use of green wood as fuel in archaeological charcoal. *Journal of Archaeological Science*, http://www.sciencedirect.com/science?_ob=PublicationURL&_hubEid=1-s2.0-S0305440311X00122&_cid=272428&_pubType=JL&view=c&_auth=y&_acct=C000029858&_version=1&_urlVersion=0&_userid=6853449&md5=bf96ae3b1beb17df6d1ae5fabe66fa48, 39 (2) : 381-388.

Théry-Parisot I. (2001) – Economie des combustibles au Paléolithique, Anthracologie, Expérimentation, Taphonomie. Paris : CNRS-éditions, Dossier de Documentation Archéologique, 20, 2001, 195 p.

Trabaud L. (1989) – *Les Feux de Forêts. Mécanismes, Comportements et Environnement.* France-Sélection 1989., 278 p.