Etudier les forêts métallurgiques : analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. L'exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin

Sandrine Paradis-Grenouillet

▶ **To cite this version:**

Sandrine Paradis-Grenouillet. Etudier les forêts métallurgiques : analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. L'exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin. Sciences de l'Homme et Société. Université de Limoges, 2012. Français. NNT : . tel-01131807

HAL Id: tel-01131807
https://unilim.hal.science/tel-01131807

Submitted on 23 Mar 2015

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.

UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE 526 Société et organisations

FACULTE des Lettres et des Sciences Humaines

GEOLAB UMR - 6042 - CNRS

Thèse pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges en géographie

Etudier les « forêts métallurgiques » : analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques

Exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin

PARADIS-GRENOUILLET Sandrine

Thèse dirigée par Philippe Allée et Marie-Claude Bal-Serin

Soutenue le 16 novembre 2012

COMPOSITION DU JURY

Philippe ALLÉE	
Professeur, Université de Limoges, Géolab, UMR-6042, CNRS	**Directeur de thèse**
Aline DURAND,	
Maître de Conférence à l'Université d'Aix-Marseille	Rapporteur
Dominique MARGUERIE,	
Directeur de recherche, C.N.R.S.	Rapporteur
Danielle ARRIBET-DEROIN,	
Maître de Conférence à l'Université Paris 1	Examinateur
Alexa DUFRAISSE,	
Chargée de recherche, C.N.R.S.	Examinateur
Oliver NELLE,	
Professeur à l'Université de Kiel, Ecology-Center	Examinateur
Stéphanie THIEBAULT,	
Directrice de recherche, C.N.R.S.	Examinateur

Université de Limoges | GEOLAB UMR 6042 CNRS

Année 2012

cnrs

Résumé

Les forêts ont toujours été au cœur d'enjeux sociétaux et parmi eux les activités métallurgiques, grosses consommatrices de bois, ont joué un rôle important dans leur évolution.

Considérées généralement comme « prédatrices » des espaces boisés, les activités métallurgiques peuvent aussi être considérées comme « protectrices » des forêts, comme un moyen de valoriser des espaces délaissés. Les relations entre les activités métallurgiques et les forêts sont d'une extrême complexité et intéressent de nombreuses disciplines, chacune utilisant des documents et des méthodes spécifiques. Approches historiques, géographiques, archéologiques ou encore archéobotaniques et paléoenvironnementales permettent d'évoquer la question des « forêts métallurgiques ».

Cette thèse aborde la question des « forêts métallurgiques » à travers ces différents champs disciplinaires et thématiques. En combinant approches méthodologiques et théoriques, démarches expérimentales et applications sur des contextes régionaux et historiques privilégiés, de nouvelles approches sont proposées pour parler de la question des « forêts métallurgiques » de manière transversale.

Centré sur l'étude des documents historiques des établissements sidérurgiques du Périgord-Limousin et sur l'analyse anthracologique des plateformes de charbonnage médiévales du mont Lozère, ce travail est l'occasion de développer de nouvelles démarches. La mise en place de ratios pour évaluer les surfaces de taillis consommés à partir de quantités de métal produites et l'étude des cadastres napoléoniens permettent d'évaluer l'emprise des activités sidérurgiques sur le couvert forestier. D'autre part la démarche expérimentale conduite sur trois charbonnières permet d'affiner et de développer de nouvelles méthodes pour restituer le diamètre des bois afin d'envisager plus sereinement l'étude des sylvofaciès charbonnés.
Cette thèse, très méthodologique, propose aujourd'hui une nouvelle façon de penser l'étude des « forêts métallurgiques ».

Mots clés : Forêt, métallurgie, anthracologie, étude du diamètre des bois, charbonnière, approches expérimentales

Abstract

Forests have always been at the heart of societal stakes, such as metallurgical activities, which consume a great quantity of wood. The latter have played an important role in the evolution of forests.

Generally considered as “predators” of wooded areas, metallurgical activities can also be considered as “protectors” of forests, as a means of valorizing abandoned spaces. The relationships between metallurgical activities and forests are extremely complex and implicate numerous disciplines, with each discipline using specific documents and methods.

Historical, geographical, archaeological or archaeobotanical, and paleo-environmental approaches enable us to evoke the question of « metallurgical forests ». This thesis addresses the question of “metallurgical forests” across these different disciplines and themes. By combining methodological and theoretical approaches, experimental initiatives and applications on privileged regional and historical contexts, new approaches are proposed to speak about the question of « metallurgical forests » in a transversal manner.

Based on the study of historical documents coming from steel establishments of the Périgord-Limousin area and on the anthracological analysis of medieval charcoal platforms of Mont Lozère, this work offered the occasion to develop new approaches. The putting into place of ratios to evaluate the surfaces of coppices consumed based on the quantity of metal produced and the study of the Napoleonic cadastres enables us to evaluate the hold exerted by the steel activities on the forest cover. The experimental approach conducted on three charcoal burning sites enabled us to fine-tune and develop new methods for recreating the diameter of wood which permitted us to envisage better the study of charcoal sylvofacies.

This thesis, which takes a highly methodological approach, proposes today a new conception of the study of « metallurgical forests ».

Key words : Forests, metallurgy, charcoals analysis, wood diameters studies, charcoal burning, esperimental approches

« Les traces, par définition, ne sont donc jamais visibles en tant que traces.
Elles ne sont visibles que si elles sont cherchées
comme des marques de ce qui n'est plus là »

Pascal Quignard. Sur le Jadis.

Remerciements

Au moment de clore ce travail, je souhaite remercier toutes les personnes qui ont contribué à faire avancer cette recherche.

Tout d'abord je remercie Philippe Allée. Depuis les fouilles réalisées sur le site de Narses Mortes jusqu'à aujourd'hui il a su me faire découvrir l'intérêt des analyses de charbons de bois pour restituer les paléopaysages. Ses conseils, toujours avisés, m'ont permis d'aller toujours plus loin dans mes démarches méthodologiques et expérimentales et dans mes réflexions. Ce travail lui doit beaucoup.
Merci également à Marie-Claude Bal-Serin pour avoir accepté de m'accompagner à la fin de ce travail.

Je remercie la Région Limousin pour avoir financé cette recherche, ainsi que le département de Géographie pour m'avoir fait confiance en me confiant des postes d'Attachée Temporaire d'Enseignement et de Recherche pendant deux ans.

Je remercie les membres du laboratoire Géolab (UMR 6042 CNRS) de Limoges qui m'ont accueillie et accompagnée au long de ces années, en mettant à ma disposition les locaux et le matériel nécessaire à la réalisation de ces travaux. Un grand merci à Frédéric Richard, le directeur de site, pour sa disponibilité et sa réactivité pour élaborer les dossiers nécessaires aux financements de datations au carbone 14 ou autres analyses. Merci également à Yannick Miras, responsable de l'équipe « Paléoenvironnenent et Géoarchéologie », pour les nombreuses discussions plus que constructives.

Mes remerciements se tournent également vers Aline Durand et Dominique Marguerie pour avoir accepté d'évaluer mon travail en tant que rapporteurs ainsi que vers Danielle

Arribet-Deroin, Alexa Dufraisse, Oliver Nelle et Stéphanie Thiébault pour l'honneur qu'ils me font d'être membres de mon jury.

Je dois également beaucoup à l'équipe des « Charbouniers » de Quincy, à Pierre Veysseix (directeur de la Tuilerie de Pouligny) et à tous ceux qui ont « joué » de la tronçonneuse ou du mètre à ruban pour préparer les bois nécessaires à la réalisation des charbonnières expérimentales. Sans eux, la démarche expérimentale n'aurait pas pu être réalisée, je les en remercie.

Enfin, je souhaite vivement remercier Alain Ploquin et Marie-Christine Bailly-Maître qui, en m'accueillant sur les ateliers métallurgiques du Mont Lozère m'ont donné le goût pour l'archéométallurgie. Merci Alain pour avoir partagé une partie de ton savoir.

Ces recherches, intégrées au sein de deux Programmes Collectifs de Recherche, ont un peu contribué à amplifier les démarches pluridisciplinaires largement développées autour de l'histoire des forêts et de leur gestion. Chaque réunion, chaque rapport ont été l'occasion de mûrir ce travail de recherche, de soulever de nouvelles pistes conduisant à aller toujours plus loin dans les démarches expérimentales. Je tiens à exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des membres de ces deux groupes de travail, nombreux sont ceux qui ont collaboré de près à la réalisation de ce travail.

Merci notamment à :

- Jean Philippe Leleu pour la réalisation de l'application AnthracoLoJ qui, aujourd'hui, simplifie grandement l'acquisition des données dendro-anthracologiques.
- Christelle Belingard pour les heures passées devant un tableur Excel à définir quelles étaient les simulations les plus appropriées
- Remi Crouzevialle pour la réalisation de la base de données web sur la métallurgie du fer en Périgord Limousin, mais également pour tous ses conseils lors de la réalisation des cartes.
- Serge Baron, Jacques Combeau, Graziella Rassat pour le temps passé aux archives à dépouiller les cadastres napoléoniens
- Aux membres de la Route des Tonneaux et des Canons pour avoir partagé leur joie de vivre (et leurs pique-niques) lors des campagnes de prospections.

La construction d'une thèse se fait également en partageant avec l'ensemble des collègues vivant la même aventure. Merci à l'ensemble des doctorants et anciens doctorants avec qui j'ai pu partager les moments de joie mais aussi de découragement ou de colère ; je les remercie pour leur soutien : Pauline, Greta, Gabriel, Graziella, Romain, Julien, Claire, Etienne, Anne…

Un merci tout particulier à Romain Rouaud, collègue doctorant mais surtout ami, avec qui j'ai pu échanger au cours de ces années de thèse. Dans le même bateau sur la question du charbonnage, nos problématiques ont évolué ensemble, et la démarche expérimentale élaborée en commun offre aujourd'hui de très beaux résultats. Pour cela je lui dois beaucoup.

Je dois également remercier les relecteurs de ce travail, Bernadette, Christine, Serge, Katia, Vanessa, Graziella etc. et aux « traducteurs » des différents résumés et communications Amy, Sylvain, Emma etc. Pour l'aide apportée encore un grand merci.

Enfin je veux exprimer ma profonde reconnaissance à mes proches, ma famille qui m'ont soutenue, aidée moralement mais également sur le terrain à faire de cette recherche ce qu'elle est aujourd'hui.

Un merci tout particulier à Guillaume qui a su m'accompagner, m'aider, m'écouter et me soutenir au cours de cette longue aventure qu'est la thèse. La liste des remerciements serait bien trop longue à énumérer. Je le remercie d'avoir été à mes côtés. Je lui dois énormément.

Pour finir, un grand merci à Maxime, ses éclats de rire permettent de garder le moral quoi qu'il arrive.

Enfin à tous ceux que je n'ai pas mentionné dans ces quelques lignes, et ils sont nombreux, un grand merci.

Sommaire

Remerciements **3**

Sommaire **7**

Introduction **15**

Chapitre 1 : Les « forêts métallurgiques » : état de la question ... **21**

Introduction **21**

1. Les « forêts métallurgiques » : une définition **22**

2. Etudier les « forêts métallurgiques » à partir de l'approche historique **26**

2.1. Une grande diversité de documents *26*

2.2. Etude des activités métallurgiques, étude de la forêt : deux axes de recherches souvent menés en parallèle *33*

3. L'archéologie et l'anthracologie, un autre moyen d'approcher les « forêts métallurgiques » **45**

3.1. L'archéométallurgie principalement centrée sur l'histoire des techniques *45*

3.2. L'approche anthracologique peu développée sur les sites métallurgiques *49*

3.3. Sortir des sites archéométallurgiques pour étudier les forêts *51*

Conclusion **55**

Chapitre 2 : Les « forêts métallurgiques » du Périgord Limousin des XVIIIe et XIXe siècles : entre valorisation et surconsommation des bois: l'intérêt d'étudier les sources écrites..... 57

Introduction..... 57

1. Les forêts au cœur des activités sidérurgiques 60

1.1. L'approvisionnement en bois, responsable de l'organisation des territoires sidérurgiques..... 60

1.2. « Forges prédatrices, forges protectrices », le rôle ambigu des activités sidérurgiques sur les espaces forestiers 64

2. Evaluer les besoins en bois pour les forges du XVIIIe au XIXe siècle en Périgord Limousin 67

2.1. Répertorier les établissements sidérurgiques, première étape pour évaluer l'importance de la métallurgie du fer en Périgord Limousin..... 67

2.2. Retrouver la production des établissements sidérurgiques..... 72

2.3. De la production de fonte et de fer aux surfaces de forêts exploitées..... 85

3. Evaluer les ressources forestières sur les communes proches des établissements sidérurgiques à partir des documents cartographiques..... 103

3.1. Retrouver les surfaces forestières à partir des enquêtes statistiques..... 103

3.2. La carte de Cassini, les espaces forestiers inégalement représentés 104

3.3. Les relevés à l'échelle de la parcelle : le meilleur moyen de calculer le potentiel forestier par commune..... 106

3.4. Le cadastre napoléonien : entre livre de compte et document cartographique..... 107

4. L'approvisionnement en bois des forges en Périgord Limousin : l'exemple de Savignac-Lédrier. 110

4.1. Des productions de fonte et de fer aux surfaces de taillis consommées 110

4.2. Evaluer les surfaces de taillis du début du XIXe siècle sur les communes approvisionnant la forge de Savignac-Ledrier..... 114

4.3. Les forêts du Périgord Limousin : des « forêts métallurgiques » à la production de bois de fente..... 121

Conclusion..... 124

Chapitre 3 : Etudier les plateformes de charbonnage pour restituer les sylvofaciès des « forêts métallurgiques » 127

Introduction 127

1. La production de charbon de bois, une activité qui laisse des traces dans les paysages 129

1.1. Aménagement des plateformes : l'emplacement, un choix stratégique marquant le paysage 131

1.2. La construction de la meule 133

1.3. Le temps de la carbonisation 139

1.4. Le temps de la récolte du charbon de bois 144

1.5. Des plateformes réemployées ou abandonnées 146

2. Marqueurs spatiaux, temporels et botaniques pertinents pour étudier les « forêts métallurgiques » 147

2.1. Sortir des sites métallurgiques pour étudier la relation entre les activités métallurgiques et la forêt, une démarche surprenante à ses débuts 147

2.2. L'approche spatiale : première étape à l'étude des forêts charbonnées 150

2.3. L'analyse anthracologique des plateformes de charbonnage : deuxième étape à l'étude des forêts charbonnées 152

2.4. La datation des plateformes de charbonnage : élément pour une étude diachronique 166

3. Mieux interpréter les résultats de l'analyse anthracologique des plateformes de charbonnage : la nécessité de l'expérimentation 169

3.1. Quelques expérimentations pour tester la représentativité des spectres anthracologiques en contexte de charbonnage 170

3.2. Une nouvelle expérimentation pour tester le comportement d'essences typiques du Massif central 172

Conclusion 189

Chapitre 4 : Mesurer le rayon de courbure : première étape pour estimer le diamètre des bois charbonnés 191

Introduction 191

1. Evaluer la fiabilité des différentes méthodes de mesure utilisant un analyseur d'images 193

1.1. Présentation des différentes techniques de mesure 194

1.2. Protocole de mesure 199

1.3. L'angle, la distance entre les rayons et la longueur du rayon : trois paramètres étroitement liés dans la mesure du rayon de courbure 203

1.4. Résultats bruts et traitement des données 204

1.5. L'angle entre les rayons, un paramètre influençant la précision de la mesure 211

1.6. La distance entre les rayons, un moyen d'établir la taille minimale des échantillons à analyser 216

1.7. Définir la taille maximale des rayons de courbure mesurables 219

1.8. La technique utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle, la plus simple et la plus efficace 222

2. « AnthracoLoJ », un outil pour simplifier et automatiser la mesure du rayon de courbure 224

2.1. Principe et fonctionnement de l'application 224

2.2. Evaluer la précision de l'outil « AnthracoLoJ » sur des rondelles de bois et sur des fragments de charbons de bois 227

2.3. Définir l'erreur associée à la mesure pour « l'outil AnthracoLoJ » 235

3. Tester la représentativité des spectres dendrométriques sur des charbonnières expérimentales 238

3.1. Connaître le diamètre des bois mis dans les meules 238

3.2. Analyse dendro-anthracologique : de la mesure du rayon de courbure à la construction des spectres 252

3.3. Tester la représentativité des spectres dendro-anthracologiques 260

Conclusion 269

Chapitre 5 : Interpréter les spectres dendro-anthracologiques pour restituer le diamètre des bois 271

Introduction 271

1. Protocole mis en place par O. Nelle et T. Ludemann 273

1.1. Principes et méthodes 273

1.2. Application sur les trois charbonnières expérimentales de Pouligny 275

2. Protocole mis en place par A. Dufraisse 285

2.1. Principes et fonctionnement 285

2.2. Application aux charbonnières expérimentales de Pouligny 289

3. Retrouver le diamètre des bois charbonnés à partir d'une démarche comparative 295

3.1. Construire les simulations de référence 296

3.2. Validation de la démarche comparative à travers l'approche expérimentale 308

3.3. Vers des histogrammes représentant les types de peuplements, les modes de gestion 320

Conclusion 322

Chapitre 6 : Les « forêts métallurgiques » du mont Lozère 323

Introduction 323

1. Le mont Lozère, un territoire connu pour son passé métallurgique 325

1.1. Historique des recherches conduites sur le mont Lozère 326

1.2. Les acquis des programmes de recherches 327

2. Retrouver l'étendue de la « forêt métallurgique » médiévale du mont Lozère 335

2.1. Prospection et localisation des plateformes 335

2.2. Les activités de charbonnage contemporaines des ateliers de réduction 337

2.3. Organisation du territoire métallurgique à l'époque médiévale 341

2.4. Reconstruction des anciennes forêts charbonnées 346

3. Anthracologie de la forêt charbonnée à l'époque médiévale 349

3.1. De la plateforme au laboratoire 349

3.2. Le charbonnage de la hêtraie à l'époque médiévale..... 352

3.3. Une gestion durable des taillis de hêtre 355

Conclusion. 371

Conclusions et perspectives 373

Bibliographie 381

Sommaires des figures 405

Annexes 413

Annexes du Chapitre 3..... 414

Annexes du chapitre 4 418

Annexes du chapitre 5 423

Annexes du chapitre 6 444

« L'histoire de la métallurgie en France renvoie
Inéluctablement à l'histoire de la forêt
et inversement » J. Bonhôte, 1998.

Introduction

Le combustible à usage proto-industriel a joué un rôle majeur dans l'histoire des forêts. Le bois, employé jusque dans les années 1860, date de la généralisation de l'emploi du charbon de terre, est indispensable à la production de métal.
Métallurgies du fer, du plomb, de l'argent, de l'or etc., toutes ont besoin de bois et cela quelle que soit la période chronologique. La relation entre les activités métallurgiques et la forêt est indéniable, mais son étude est d'une extrême complexité. Chaque métallurgie, chaque période et chaque secteur géographique a sa propre histoire de l'exploitation des forêts pour produire du métal. Considérées généralement comme « prédatrices » des espaces boisés, les activités métallurgiques peuvent à l'inverse être perçues comme « protectrices » des forêts, comme un moyen de valoriser des espaces délaissés (Woronoff, 1984 ; Husson, 1995).

Le lien, si prégnant entre les activités métallurgiques et la forêt, est d'ailleurs à l'origine de la construction de l'appellation « forêts métallurgiques » (Houzard, 1980 ; Houzard *et al.*, 1983 ; Bechmann, 1984). Bien que peu employée dans la littérature cette appellation nous semble particulièrement adaptée pour évoquer les questionnements propres à l'étude des forêts alimentant les fours de réduction et les ateliers qui travaillent le métal.

Les activités métallurgiques ont laissé de nombreuses traces dans l'environnement, les paysages mais également dans les textes. La grande diversité des archives disponibles conduit souvent à cloisonner les recherches par champ disciplinaire, chacun ne faisant qu'effleurer la complexité des relations existantes entre les activités métallurgiques et les forêts.

Ce sont les textes qui ont en premier suscité l'intérêt des chercheurs. Archives comptables, notariales, cléricales, cahiers de doléances, livres de roulement, cahiers des gardes forestiers etc., sont autant de sources à dépouiller, décrypter, analyser afin d'en extraire de précieuses informations. Les recherches conduites sont alors généralement centrées soit sur les activités métallurgiques en tant que telles ou bien sur l'histoire des forêts, chacune évoquant brièvement la relation entre les forêts et les ateliers métallurgiques (Levainville, 1922 ; Devèze, 1961).

Ce n'est que dans les années 1980 que les historiens, les géographes et les sociologues s'intéressent réellement à la question des relations entre les activités métallurgiques et les massifs forestiers (Dornic, 1984 ; Lamy, 1984 ; Andrieux *et al.*, 1988 ; Woronoff, 1990; Belhoste, 1990). Ces travaux traitent généralement de l'impact des hauts fourneaux sur les forêts compte tenu des corpus documentaires plus riches pour les Temps Modernes et l'Epoque Contemporaine.

Dans le même temps on voit se développer les recherches en archéologie et notamment en archéométallurgie. Les fouilles d'ateliers de réduction, de forges etc. retracent progressivement l'histoire des métallurgies et les évolutions technologiques des métallurgies anciennes (proto-historiques, antiques et médiévales). L'analyse des charbons de bois retrouvés sur les sols d'ateliers ou encore dans des fosses de stockage restitue la végétation exploitée et permettent alors d'aborder la question du type de combustible employé (Pelet *et al.*, 1973, 1993 ; Eschenlohr et Serneels, 1991 ; Dunikowski et Cabboi, 1995 ; Dieudonné-Glad, 2010).

Finalement, le cloisonnement des recherches conduit souvent à étudier séparément les activités métallurgiques et l'histoire des forêts. Les années 1990 marquent un tournant dans l'étude des « forêts métallurgiques » mettant en exergue la nécessité de conduire des approches croisées, pluridisciplinaires. Les deux colloques « Forges et forêts, recherches sur

la consommation protoindustrielle de bois) (Woronoff *et al*, 1990) et « Protoindustries et histoire des forêts » (Métailié *et al.*,1992) réunissent historiens, archéologues, géographes, archéobotanistes et paléoenvironnementalistes autour d'une même question : le rôle des activités protoindustrielles dans l'histoire des forêts. Les activités métallurgiques occupent une part importante de l'ensemble des contributions.

Les travaux conduits dans les Pyrénées dans les années 1990 développent particulièrement bien cette nouvelle démarche. En croisant démarches historiques, archéologiques et archéobotaniques ils approchent au mieux l'histoire de ces « forêts métallurgiques ». La mise en évidence de l'intérêt de sortir des sites métallurgiques pour étudier directement les zones de production du charbon de bois, les plateformes de charbonnage, est une étape importante dans l'étude des anciennes forêts ; elle permet d'approcher au plus près de la composition des sylvofaciès charbonnés (Métailié et Jalut, 1991 ; Bonhôte, 1994, 1998 ; Davasse, 1999, 2000 ; Izard, 1999).

Ce travail de thèse s'inscrit dans ces thématiques de recherche, étudiant la question des « forêts métallurgiques » à travers ces différents champs disciplinaires et thématiques. En combinant approches méthodologiques et théoriques, démarches expérimentales et applications sur des contextes régionaux et historiques privilégiés, nous proposons de nouvelles démarches pour aborder la question des « forêts métallurgiques » de manière transversale. Nous n'avons pas choisi une approche régionale mais plutôt une démarche méthodologique, permettant l'élaboration de méthodes et d'outils pour évaluer l'emprise des activités métallurgiques sur le couvert forestier.

C'est à travers deux Programmes Collectifs de Recherches (PCR) que ces travaux ont pu être réalisés. En effet, ces PCR conduits depuis de nombreuses années ont largement développé ces approches pluridisciplinaires à travers des collaborations entre historiens, géographes, archéologues et archéobotanistes et proposent aujourd'hui des corpus documentaires importants sur lesquels nous nous sommes appuyés.

Les travaux conduits depuis 2006 d'abord en Limousin, « Géohistoire et géoarchéologie des territoires forestiers limousins » (dir Allée), puis en Limousin Poitou-Charentes, « Géohistoire et géoarchéologie des forêts combustibles en Limousin Poitou-Charentes

(dir Rouaud), étudient les anthroposylvosystèmes du passé et du présent, retracent leur évolution et le rôle fondamental qu'ils jouent dans les sociétés (Allée *et al.*, 2006, 2009). Les activités métallurgiques y prennent une place non négligeable, les activités sidérurgiques ayant été largement développées sur ce territoire au cours des Temps Modernes et de l'Epoque Contemporaine. Il s'agissait dans le cadre de ce travail d'évaluer l'emprise des hauts fourneaux et des affineries sur les forêts du Périgord Limousin et ainsi mettre en évidence la gestion de ces « forêts métallurgiques »

S'il est possible à travers les documents historiques d'évaluer l'emprise des activités métallurgiques sur le couvert forestier, en l'absence de sources écrites, la relation entre forêts et métallurgie est plus délicate à retracer.

Les recherches conduites sur le mont Lozère depuis maintenant 15 ans sont confrontées à ce problème. Le PCR, dirigé par A. Ploquin « Plomb ancien du mont Lozère, à la recherche des mines, des minerais, des ateliers, des paysages et des hommes », a restitué globalement l'organisation d'un territoire métallurgique médiéval (Ploquin *et al*, 2002, 2004, 2007, 2011 ; Baron, 2005), mais l'image de la « forêt métallurgique » est encore floue. L'analyse des plateformes de charbonnage, connues en nombre sur le mont Lozère, permet aujourd'hui de restituer les sylvofaciès de cette forêt disparue. C'est en développant les approches spatiales et les analyses anthracologiques sur ce territoire que l'histoire de la « forêt métallurgique » médiévale du mont Lozère est progressivement retracée.

Pour répondre à ces questionnements, il a fallu développer différentes approches méthodologiques et expérimentales et cela notamment pour les analyses anthracologiques des plateformes de charbonnage. En effet, les méthodes en anthracologie ont beaucoup évolué depuis les premières études réalisées sur les plateformes de charbonnage. Aujourd'hui, au delà de la détermination taxonomique, il est envisageable d'étudier le diamètre des bois brûlés. Or, cette démarche relativement récente, (Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Dufraisse, 2002) doit être approfondie à partir de corpus expérimentaux.
Ainsi, une large partie de ce travail a été consacrée à l'évaluation de la fiabilité des outils de mesure du rayon de courbure et à vérifier la représentativité des spectres dendro-anthracologiques obtenus à l'issue de carbonisation en charbonnière. La démarche expérimentale conduite sur trois charbonnières apporte des résultats particulièrement

satisfaisants et permette d'envisager sereinement l'application de cette approche sur des corpus archéologiques.

Cette recherche centrée sur l'histoire des « forêts métallurgiques » s'est appuyée sur deux corpus documentaires très différents : les sources historiques et les plateformes de charbonnage pour tenter d'évaluer au mieux l'emprise des activités métallurgiques sur les espaces forestiers. Entre démarche méthodologique, expérimentale et application sur des contextes d'études privilégiés, notre propos est ordonné au sein de 6 chapitres.

Le premier chapitre intitulé : « Les forêts métallurgiques, état de la question », constitue un développement de l'introduction afin de mieux appréhender les questions qui se posent pour étudier les relations entre les espaces forestiers et les activités métallurgiques tout en les replaçant dans les dynamiques de recherches conduites actuellement.

Dans le second chapitre nous proposons une démarche méthodologique pour évaluer l'emprise des établissements sidérurgiques des Temps Modernes et de l'Epoque Contemporaine du Périgord Limousin sur le couvert forestier.

Le troisième chapitre est intitulé « Etudier les plateformes de charbonnage pour restituer les sylvofaciès des forêts métallurgiques ». Dans ce dernier nous développons le principe et le fonctionnement de la carbonisation en meule, étape indispensable pour mieux interpréter les analyses anthracologiques conduites par la suite.

Les chapitres 4 et 5 sont quant à eux centrés sur l'étude du diamètre des bois. Nous avons tenu à dissocier en deux chapitres les deux étapes fondamentales à la restitution du diamètre des bois. Le chapitre 4 traite de la mesure du rayon de courbure, le chapitre 5 des protocoles nécessaires à la restitution du diamètre des bois à partir d'une multitude de rayons de courbure mesurés.

L'ensemble des résultats présentés dans le cadre de ces chapitres ont été testés et validés à partir d'une démarche expérimentale conduite sur trois charbonnières pour lesquelles le diamètre de l'ensemble des bûches était parfaitement connu. Cette approche expérimentale a ainsi permis de montrer la capacité des outils et des méthodes à restituer le diamètre des bois, tout en montrant également les limites de cette étude.

Enfin pour clore ce travail, nous avons, dans le chapitre 6, appliqué les outils et les méthodes mis en place sur des plateformes de charbonnage archéologiques du mont Lozère, apportant ainsi de nouvelles données sur l'organisation du territoire métallurgique étudié dans le cadre du PCR.

Nous espérons, à travers ce travail, apporter de nouveaux éclairages sur l'étude des « forêts métallurgiques » et sur les manières de les étudier.

Chapitre 1 : Les « forêts métallurgiques » : état de la question

Introduction

Etudier les « forêts métallurgiques », forêts ayant pour vocation de produire le combustible pour les activités métallurgiques, n'est pas chose simple. Ces forêts ont une histoire pluriséculaire présentant de nombreuses variations en fonction des lieux, des périodes mais également du type de métallurgie. En effet, il n'existe pas une métallurgie mais plutôt des métallurgies. Métallurgie du fer, du cuivre, de l'or, de l'argent et bien d'autres encore, chacune a son histoire. Cependant, quel que soit le type de métallurgie, l'époque et le lieu, l'approvisionnement en bois est incontournable pour les métallurgistes. « *L'histoire de la métallurgie renvoie inéluctablement à l'histoire de la forêt et inversement : pénurie ou économie de combustible, qualité des produits, plaintes des communautés, rapport des administrations de tutelle, dégradation voir disparition de la forêt… Autant de thèmes récurrents dont les archives abondent. Le mode de production de la forge s'avère intimement lié à la forêt par un lien qui ne se dénoue que vers 1830 quand le combustible fossile se substitue au combustible végétal avec des décalages selon les aires techniques. La question des bois et du combustible est donc bien au cœur de la métallurgie* » (Bonhôte, 1998, p 11).

Ce premier chapitre introductif a pour objectif de replacer l'étude des « forêts métallurgiques » dans le contexte global de la recherche. Souvent délaissés, négligés par les chercheurs, les espaces forestiers dédiés à la production de métal sont aujourd'hui au centre de nos recherches.

1. Les « forêts métallurgiques » : une définition

Avant l'utilisation des énergies fossiles comme le charbon de terre, les activités métallurgiques sont très consommatrices de bois et très souvent considérées comme étant « dévoreuses de forêts » (Dornic, 1984 ; Andrieux, 1987 ; Woronoff, 1990a, 1990b). Dans les pays industrialisés, depuis le milieu du XIXe siècle, l'usage industriel du bois s'est considérablement réduit ; en revanche la métallurgie au bois est encore d'actualité dans certains pays en développement (Kiéthéga, 2009). Cette étude porte essentiellement sur l'histoire des « forêts métallurgiques » françaises et plus particulièrement sur les stratégies d'approvisionnement.

Depuis la mine jusqu'à l'objet, le bois était indispensable à chaque étape de la chaine opératoire. « *Son exploitation intensive* [des forêts] *provoque des conflits d'intérêts, des réglementations dont les archives se font l'écho* » (Burnouf *et al.*, 2008, p 110). C'est sous différentes formes que le bois était employé dans les activités métallurgiques. Sous forme de bois d'œuvre pour étayer les galeries, de bois bûches pour l'abattage par le feu dans les mines, sur le carreau de la mine pour l'opération de grillage ou bien encore sous forme de charbon de bois dans les phases de réduction du minerai et du travail du métal. Les procédés de réduction et de travail du métal étaient probablement les étapes les plus gourmandes en bois et plus particulièrement en charbon de bois. La production du charbon de bois pour les activités métallurgiques est donc une activité à part entière. Directement installés dans les forêts, les charbonniers coupaient et transformaient les bois sur place dans des fosses, des meules ou bien des fours. Les importantes quantités de charbon de bois nécessaires au bon fonctionnement des différentes activités métallurgiques laissent présager la gestion d'espaces forestiers principalement dédiés à la production de combustible pour la métallurgie, d'où l'intérêt d'employer le terme « forêts métallurgiques ».

L'appellation « forêts métallurgiques » est finalement peu employée dans la littérature. On la voit apparaître dans les années 1980 dans des travaux de biogéographie et de géohistoire (Houzard, 1980 ; Houzard *et al.*, 1983 ; Bechmann, 1984). Malgré l'utilisation de cette appellation, on ne trouve pas de véritable définition de « forêts métallurgiques » comme si le terme était assez évocateur. Il nous semble néanmoins important de le définir.

Les « forêts métallurgiques » sont les massifs forestiers ayant pour principale vocation de produire le combustible pour les activités métallurgiques. L'utilisation de cette appellation témoigne vraiment d'une volonté d'étudier de façon intégrée les relations existant entre le milieu forestier et les activités métallurgiques.

A ce jour, peu de travaux abordent réellement la question de l'approvisionnement en combustible pour les activités métallurgiques. La majorité des travaux présente d'un côté la métallurgie et de l'autre la forêt. Cette organisation binaire est flagrante à la lecture des titres de certains travaux. Les mots « métallurgie », « forge », « fer », « métaux » sont souvent juste apposés aux mots « forêts », « bois », « charbons de bois ».
Prenons différents exemples de titres d'articles ou d'ouvrages :

- « *Métallurgie au bois et utilisation de la forêt* » (Arnould, 1978)
- « *Forges et forêts : histoire industrielle de la France* », (Andrieux *et al.*, 1988)
- « *Forges et forêts : recherches sur la consommation proto-industrielle de bois* » (Woronoff, 1990a)
- « *Forge et charbonnage dans les forêts du Capcir (Pyrénées de l'Est) dans la seconde moitié du XVIIIe siècle* » (Fruhauf, 1992)
- « *Le bois, le fer et l'eau en forêt d'Othe à la fin du Moyen Age : bilan et perspectives* » (Beck et al., 1994)
- « *Une industrie reconnue : fer charbon acier dans le Pays de Vaud* » (Pelet, 1993)
- « *Forges et forêts dans les Pyrénées ariégeoises : pour une histoire de l'environnement* ».(Bonhôte, 1998)
- « *Métallurgie et défrichement en forêt de Paimpont au Moyen Age* » (Duval, 2000)

Quelques titres néanmoins témoignent d'une volonté de développer des approches plus intégrées.

- « *Le fer contre la forêt* » (Dornic, 1984)
- « *De la forêt au métal : premières données diachroniques et archéologiques en Ariège* » (Dubois, 1992)

On trouve également la publication de la table ronde nationale d'histoire des mines et de la métallurgie organisée en octobre 1988 par Jean Yves Andrieux et Anne Brule. Dans les contributions publiées, la question des paysages miniers et métallurgiques est largement abordée, elle est l'un des thèmes fédérateurs de cette réunion. Mais dans ces travaux,

les paysages se résument à la mine, au carreau de la mine, aux installations minières et métallurgiques. La part consacrée au combustible reste très faible et la forêt est quasiment absente des développements (Ancel et Fluck, 1989 ; Benoît, 1989a, 1989b).

Dans tous ces travaux, la question de l'approvisionnement en bois est toujours évoquée, mais le plus souvent les auteurs se contentent de simples explications des procédés pour transformer le bois en charbon comme la carbonisation en meule. L'essentiel de l'analyse porte soit sur les procédés métallurgiques, soit sur l'histoire de la forêt.

Etudier les « forêts métallurgiques » consiste à caractériser les espaces forestiers ou boisés voués à l'alimentation des « bouches à feux » (fours de réduction, ateliers du travail du métal) et à étudier également les types de bois employés. Existait-il des essences privilégiées, des diamètres de bois plus adaptés aux processus métallurgiques ? Quelles étaient les stratégies d'approvisionnement en combustible ? Ces questions poussent à réfléchir aux modes de gestion mis en place par les charbonniers ou les métallurgistes pour répondre à la demande en combustible. Cela nécessite également de retrouver la provenance des bois pour estimer les distances parcourues entre le lieu d'utilisation et le lieu de production. Les trajets entre le lieu de production et le lieu d'utilisation du charbon de bois sont importants à prendre en considération car ils pèsent fortement sur le prix du bois (Woronoff, 1981, 1989, 1990 ; Lamy, 1987). Enfin, il s'agit d'évaluer les quantités de bois prélevées, de retracer les périodes de révolution entre les coupes, afin de mesurer de façon concrète l'impact des activités métallurgiques sur les couverts forestiers.

Durant les Temps Modernes, des massifs forestiers entiers étaient gérés et dédiés à produire le charbon de bois pour alimenter les forges. (Boissière, 1990 ; Belhoste, 1992)
Les maîtres de forges ne semblent pas toujours s'approvisionner sur leurs propriétés forestières. Le bois venant parfois à manquer, ils réalisaient leurs achats de bois sur les marchés du bois (Belhoste, 1990 ; Boissière, 1990 ; Husson, 1995). C'est d'ailleurs au sujet de ces achats de bois que l'on retrouve le plus de plaintes car ces bois étaient initialement dédiés à des usages domestiques ou artisanaux. Bien que plus complexes à analyser, ces modes d'approvisionnement doivent également être étudiés.

Pour appréhender au mieux l'histoire des « forêts métallurgiques », les chercheurs disposent d'un corpus documentaire large et varié, cependant très inégal selon les périodes

chronologiques et le type de métallurgie. L'étude des « forêts métallurgiques » a jusqu'à ce jour été abordée principalement selon différentes approches : approches historiques, archéologiques, biogéographiques et écohistoriques.

L'approche historique a pris en considération la question des « forêts métallurgiques » en premier. En étudiant une grande variété d'archives (livres de comptes, cartes, plans, archives notariales ou cléricales etc.), les historiens retracent les évolutions technologiques des activités métallurgiques, évaluent les quantités de bois nécessaires pour le fonctionnement des fours (Dornic, 1984 ; Andrieux, 1987 ; Arribet-Deroin, 2008). Mais si l'approvisionnement en combustible est retranscrit dans les textes des Temps Modernes et de l'Epoque Contemporaine, il n'en est pas de même pour les périodes antérieures. Les textes étant plus rares et souvent moins précis sur ces sujets, il faut envisager d'autres moyens pour étudier la question de l'approvisionnement en combustible.

Les approches archéologiques, biogéographiques et écohistoriques développées à peu près conjointement apportent un autre regard sur l'histoire de ces « forêts métallurgiques ». La fouille des sites d'ateliers ou des complexes industriels permet de comprendre non seulement le fonctionnement des fours, les évolutions technologiques mais également l'organisation de ces activités. Corrélativement, l'examen des restes organiques, comme les résidus charbonneux, restitue de façon précise le combustible employé par les métallurgistes ainsi que la physionomie des massifs forestiers (Dubois, 1992 ; Pelet, 1993 ; Bonhôte, 1994 ; Izard, 1999).

A ce jour, les recherches sur la forêt porte essentiellement sur l'examen de l'évolution des surfaces boisées. Elles analysent les défrichements et les phases de déboisement en lien avec les fluctuations démographiques et les usagers de la forêt (chasseurs, pasteurs, bûcherons etc.). Le rôle, pourtant non négligeable des activités métallurgiques sur les massifs forestiers, n'a été que très tardivement pris en considération par la communauté scientifique (historiens comme archéologues) (Woronoff, 1990 ; Pelet, 1993 ; Bonhôte, 1993).

Depuis les années 1990, on voit progressivement apparaître des travaux plus intégrés, associant historiens de la forêt, historiens des métallurgies, archéologues et archéobotanistes pour proposer de véritables études des « forêts métallurgiques » (Jalut et Métailié, 1991 ; Ploquin *et al.*, 2004, 2007 ; Allée et Bal-Serin, 2010 ; Py, 2009 ; Oillic, 2011).

2. Etudier les « forêts métallurgiques » à partir de l'approche historique

Les recherches portant sur les activités métallurgiques et sur la forêt ont toutes été initiées par des historiens (Levainville, 1922 ; Gille, 1960 ; Devèze, 1961a, 1961b). L'analyse des textes, des documents iconographiques, des plans, des cartes, etc. apporte des informations précieuses sur l'évolution des techniques de traitement du minerai et du métal, mais également sur les modes de gestion sylvicole ou encore sur les conflits d'usage notamment entre les métallurgistes, les forestiers et les populations locales.

Les études portant sur les activités métallurgiques et sur la forêt en général ont certes été initiées par des approches historiques, mais il faut tout de même constater que l'attrait pour ces sujets apparaît tardivement. Comme le souligne P.L. Pelet, « *lorsque les archives s'ouvrent aux historiens, dans le second quart du XIXe siècle et que naît le goût des études fondées sur des manuscrits inédits, d'autres sujets que l'industrie du fer s'imposent aux premiers chercheurs : la féodalité, les couvents, les communes* » (Pelet, 1993, p 13).

2.1. Une grande diversité de documents

Les activités métallurgiques et les forêts des Temps Modernes et de l'Epoque Contemporaine sont renseignées par une documentation très riche. Archives comptables, notariales, cléricales, cahiers de doléances, livres de roulement, cahiers des gardes forestiers, ouvrages de contemporains des activités forestières et métallurgiques, plans, iconographies etc., sont autant de sources à dépouiller, décrypter, analyser pour en extraire de précieuses informations. De nombreuses études ont été conduites à partir de ces documents mais il faut bien prendre conscience que ces différents documents écrits nécessitent des compétences et des approches parfois très différentes. Un très beau travail de synthèse des différentes archives disponibles pour étudier les forêts a été réalisé en 1982 par le Groupe d'Etude des Forêts Françaises (Groupe d'histoire des forêts françaises, 1982) ; il permet à quiconque souhaitant aborder ces questions de connaître l'ensemble des sources disponibles.

2.1.1. Les documents techniques

Les ouvrages rédigés et publiés après le XVe siècle sont d'importantes sources d'informations. Ces documents souvent commandés par les autorités font un état des lieux des activités industrielles ainsi que des forêts. Les descriptions sont particulièrement fournies, chaque détail est consciencieusement rapporté, illustré, permettant ainsi au lecteur de comprendre le fonctionnement des fours de réduction ou encore les modes de gestion sylvicole pour obtenir de meilleurs rendements.

Concernant les activités métallurgiques on retrouve des ouvrages très détaillés et richement illustrés. Les travaux les plus anciens sont ceux rédigés par Vannoccio Biringuiccio, en 1540 : « *La pyrotechnia* » (Biringuccio, 1572) et de Georg Bauer, dit *Agricola* dans les années 1530-1566 « *De re metallica* » (Agricola, 1556).
Ces ouvrages relatent de façon très précise les procédés métallurgiques pour tous les types de métallurgies. On y retrouve transcrit l'ensemble de la chaîne opératoire métallurgique que ce soit pour le fer, le cuivre, l'or, l'argent ou le plomb. Ils permettent de comprendre et de retracer l'histoire et les évolutions technologiques de chacune des métallurgies.
Les techniques pour extraire, réduire le minerai et travailler le métal sont particulièrement bien décrites ; la part accordée au combustible et à la forêt reste en revanche très faible. Sur près de 240 pages, la description du charbon de bois et les procédés pour le produire ne représentent que 3 pages dans « la *Pirotechnia* ». Dans « le *De re metallica* », aucun paragraphe n'est destiné à la production de charbon, les mentions d'emploi de charbon de bois sont dispersées dans un texte de plus de 500 pages. Les modes de gestion de la forêt sont peu ou pas abordés. Le choix de privilégier certaines essences comme le Chêne et l'Orme est simplement évoqué dans l'ouvrage de Biringuccio mais de façon très succincte, en deux lignes. Au XVIe siècle, les auteurs traitant de la question de la métallurgie en général semblent ne pas se soucier de l'approvisionnement en combustible. Biringuccio écrit qu'il viendra plus rapidement à manquer de minerai que de bois : « *Parqoy il me semble chose nécessaire de vous dire quelque chose : tant pour la commodité de tels exercices, que pour autant qu'on en trouve plus aisément que du bois et en plus grande quantité. Car les mines viendront plutôt à manquer aux Hommes que le charbon ne viendra à défaillir* » (Biringuccio, 1572). A cette époque le bois semble être considéré comme une énergie renouvelable, inépuisable. La gestion de la forêt ne semble pas être au cœur des préoccupations des

auteurs. La transformation du minerai en métal relève en effet d'un savoir noble, alors que la transformation du bois en charbons de bois ne semble pas intéresser les hommes de sciences retranscrivant les savoir-faire.
Historiens et archéologues travaillant sur la métallurgie se sont, un jour ou l'autre, penchés sur ces ouvrages. Ils expliquent et illustrent le fonctionnement des activités, leur organisation dans le territoire. De la sorte, ils guident la mise en œuvre d'une démarche expérimentale pour mieux appréhender les différentes étapes de la chaine opératoire et les gestes pratiqués (Benoit *et al.*, 1988 ; Crew et Salter, 1991 ; Arribet-Deroin, 2001 ; Garçon, 2011 ; Bailly-Maître, 2011).

A partir du XVIIIe siècle, de nombreux ouvrages techniques sur les activités métallurgiques sont rédigés mais ces derniers sont beaucoup plus spécialisés, centrés sur un type de métallurgie, un type de procédé. Dans ces travaux, la sidérurgie domine très largement et ce pour les procédés les plus récents (réduction en haut fourneau et utilisation du coke) (Planckoucke et Plomteux, 1782 ; Gruner, 1875). Malgré la précision des descriptions, ces documents abordent peu la question du bois ; l'utilisation du charbon de terre étant largement développée.

Concernant les travaux portant sur les forêts on mentionnera :

- les travaux de George-Louis Leclerc de Buffon, *« Mémoire sur la conservation et le rétablissement des forêts »,* (Buffon, 1739) et *« Mémoire sur la culture des forêts »,* (Buffon, 1742);
- ceux d'Henri Louis Duhamel du Monceau avec *« De l'exploitation des bois ou moyens de tirer un parti avantageux des taillis, demi-futaies et hautes-futaies, et d'en faire une juste estimation, avec la description des arts qui se pratiquent dans les forêts »* (Duhamel Du Monceau, 1764) ;
- ou encore le *« Manuel forestier et portatif » de Guyot,* (Guyot, 1770)

Ces différents travaux montrent combien cette période est un moment clé dans les changements des modes de gestion sylvicole. Des études très précises se mettent en place dans le but d'obtenir de meilleurs rendements en bois pour les différentes demandes (bois de chauffage, charbon de bois, bois d'œuvre ou encore bois pour la marine). Il est intéressant de signaler que ces ouvrages rédigés par des scientifiques mandatés par les autorités ne sont

pas forcément neutres pour étudier la question des modes de gestion sylvicole. En effet, le premier, George-Louis Leclerc de Buffon, est un maître de forge, ses observations et ses commentaires peuvent donc être biaisés par ses propres intérêts. Quant à Henri Louis Duhamel du Monceau, ingénieur pour la construction navale, il cherche donc à mettre en valeur les forêts pour la production de bois pour la marine royale.

L'ensemble de ces travaux est une source indispensable à l'ensemble des chercheurs travaillant sur l'histoire des pratiques sylvicoles mais doit toujours être étudié avec précaution (Corvol, 1987 ; Woronoff, 1990 ; Husson, 1995).

2.1.2. Les documents iconographiques

Les documents iconographiques sont également de très bons supports de travail. Les gravures, tableaux et dessins nous renseignent également sur les types de paysages forestiers et métallurgiques (Buffon, 1739 ; Duhamel Du Monceau, 1764, 1774). Bien que les proportions, les perspectives soient rarement respectées cela donne une idée assez précise des espaces boisés.

Les dessins réalisés par Heinrich Gross la veille d'une inspection des mines de Sainte Marie aux Mines dans les Vosges retranscrivent chaque étape de la vie des mineurs et des métallurgistes. On peut observer les outils, les gestes des ouvriers et surtout, pour ce qui nous concerne, la place prédominante qu'occupe le bois dans ces activités minières et métallurgiques. Sous forme de planches, de piquets ou de bûches dans la mine et de charbon de bois dans les fours de réduction ou encore pour le travail du métal, le bois est largement représenté.

Les plans techniques des machineries ou encore de l'organisation des complexes industriels sont également d'excellents documents pour bien comprendre le fonctionnement de ces usines.

Enfin, les cartes, les plans, les cadastres situent les ateliers et les usines dans les espaces forestiers. Ils contribuent à une véritable approche spatiale. Selon les périodes mais également en fonction des secteurs, ces documents cartographiques sont plus ou moins

fiables.

La carte la plus connue est celle de Cassini, réalisée au XVIIIe siècle. C'est la première carte générale du royaume de France. Si elle identifie et localise certains établissements métallurgiques, elle reste en revanche difficilement exploitable pour étudier les massifs forestiers. L'ensemble des espaces boisés n'est pas forcément représenté, les arpenteurs ayant souvent privilégié les grandes forêts royales négligeant les petits espaces boisés comme les forêts de pentes. On retrouve quelques cartes contemporaines de la carte de Cassini où les forêts sont mieux représentées (Durrens, 2011).

Les plans les plus représentatifs et les plus fournis sont les plans du cadastre napoléonien établis dans la première moitié du XIXe siècle. Chaque commune a été découpée en sections et pour chaque section une description de chaque parcelle est détaillée. La lecture des états de sections donne pour chaque parcelle la surface, l'utilisation (près, bois, landes, habitat etc.) et le propriétaire. L'analyse de ces documents caractérise de façon précise l'occupation du sol au début du XIXe siècle et calcule le taux de boisement par commune (Perpillou, 1940 ; Guillabot, 2006 ; Glomot et Crouzevialle, 2008 ; Glomot, 2009, Rouaud, 2009). Certains arpenteurs, plus précis que d'autres, ont même renseigné la nature des bois (taillis de chêne, futaie de hêtre, par exemple), révélant ainsi les modes de gestion pour cette période. Il faut tout de même regretter l'apparition tardive de ces documents car cela correspond à la fin de la métallurgie au charbon de bois dans la plupart des régions françaises.

2.1.3. Les documents comptables

Au delà du document cartographique, les cadastres napoléoniens sont de très bons documents comptables, c'était d'ailleurs leur vocation première. La mesure si précise de chaque parcelle visait à établir un impôt proportionnel à la valeur des biens. Il est donc possible à partir de ces archives d'évaluer le montant imposable des différents maîtres de forge, en calculant l'impôt prélevé sur leur bois mais également sur leurs bâtiments.

Il existe également bien d'autres documents de comptabilité. Livres de comptes, cahiers de gardes forestiers, enquêtes statistiques, archives notariales sont très fournis et permettent des études quantitatives très poussées.

Les livres de roulement, rédigés par les maîtres de forges, principalement après le XVIIe siècle, renseignent de façon précise les quantités de matières premières employées pour chaque coulée (minerai, charbon, castine), le prix et leur provenance sont souvent indiqués. On retrouve parfois la date et l'heure des coulées, ainsi que la masse des gueuses, le prix de vente et leurs débouchées. Ces livres de comptes, rarement conservés, ont pu faire l'objet d'études très approfondies (Lamy, 1984).
Les cahiers rédigés par les forestiers sont comparables aux livres de roulement écrits par les maîtres de forges. Ils retranscrivent l'historique de chaque journée de travail. Les dates et les lieux de plantation, de coupes, les volumes de bois sur pied et de bois coupés y sont bien détaillés.
Qu'il s'agisse des livres de roulement ou des cahiers des forestiers, ces documents ont souvent disparu ou sont conservés dans des collections privées difficiles d'accès. Bien que très précise, l'analyse reste donc partielle et ponctuelle, à la fois dans le temps et l'espace.

Les enquêtes statistiques ordonnées par les autorités offrent une vision plus globale. Au XVIIIe et XIXe siècle (1772, 1788, 1789, 1808, 1811) les activités métallurgiques ont fait l'objet de nombreuses enquêtes. Les enquêtes portant sur la forêt sont plus rares et généralement inclues dans des enquêtes plus générales.
C'est le cas de l'enquête de 1808 : « la statistique générale de la Haute Vienne en 1808 » rédigée par Texier-Olivier. Elle présente de nombreuses données chiffrées sur les quantités de bois exploitées et sur l'état des forêts (Delhoume, 2011).
Ces enquêtes appréhendent année après année l'évolution des quantités de production. Si précises soient-elles, elles doivent être utilisées avec précaution car elles rassemblent des documents déclaratifs sur lesquels les autorités s'appuient pour établir le montant des impôts. Les propriétaires de forges ou de bois déclaraient-ils la totalité de leur production.

Pour finir avec les documents comptables, on ne peut bien sûr pas oublier les actes notariés. Les notaires étaient sollicités pour rédiger de nombreux actes allant de l'acte de mariage au contrat de vente. Ces documents sont très précis mais leur étude est longue et fastidieuse car l'information sur un même sujet, en l'occurrence l'approvisionnement en bois pour la métallurgie, est dispersée parmi l'ensemble des actes (mariages, décès, vente immobilière etc.). Ces actes classés par ordre chronologique et par nom de notaires,

si personne ne s'est consacré en amont à l'élaboration d'un catalogue, il devient difficile d'effectuer des recherches thématiques dans ces liasses d'archives. En revanche, les informations acquises sont d'une grande qualité. Il est possible parfois d'obtenir le détail de coupe de bois, de leur destination et de leur prix de vente (Delhoume, 2011). Cependant, il semblerait que, pour aborder la question des relations entre forêt et métallurgie, peu de chercheurs aient eu recours à ce type de documents, probablement du fait de l'ampleur du travail à réaliser avant d'obtenir des données cohérentes.

2.1.4. Les documents témoignant de conflits

Enfin, nous aborderons ici la question d'un point de vue plus sociétal. En effet, bon nombre de textes témoigne de conflits entre différents usagers, par exemple entre les maîtres de forges et les riverains.

Quelques actes notariés se font souvent l'écho de ces conflits, les documents les plus caractéristiques des dépôts de plaintes restent les cahiers de doléances rédigés dès la fin du XVIIIe siècle. Ils sont riches en informations sur les conflits d'usages, sur les perceptions des riverains sur les différentes activités ; on y retrouve de nombreuses critiques contre les législations et l'administration forestière ainsi que sur le rôle néfaste des forges sur le milieu forestier. De nombreux auteurs ont eu recours à ce type de documents retraçant ainsi une histoire des évolutions sociétales, des relations qu'entretenaient les industriels et les forestiers (Vion-Delphin, 1989 ; Dorigny, 1989 ; Plaisance, 1989 ; Brosselin *et al.*, 1990). Cependant, il faut étudier ces documents avec précaution. Rassemblant des témoignages dans des contextes conflictuels, ils sont loin d'être neutre. Mais comme le disent A. Brosselin, A. Corvol et F. Vion-Delphin « *certes, ces documents ne sont pas sans défaut, ne serait-ce que pour laisser dans l'ombre la manière dont ils sont rédigés. Tels quels, ils ne constituent pas moins une source qu'il convient de ne pas négliger pour connaître les réactions suscitées par une industrialisation en rapide progrès* » (Brosselin *et al.*, 1990, p 11). Ils ne doivent donc pas être négligés pour étudier et comprendre les forêts métallurgiques ou tout au moins la façon dont les gens les percevaient.

Parmi l'ensemble des documents à disposition des historiens, ce sont peut être les moins précis pour étudier de manière quantitative les « forêts métallurgiques ». En revanche, ils aident à replacer les recherches dans un contexte sociétal.

2.2. Etude des activités métallurgiques, étude de la forêt : deux axes de recherches souvent menés en parallèle

L'analyse de ce corpus documentaire, certes varié et très fourni, a conduit à deux types de recherches. Certains historiens se sont intéressés principalement aux activités métallurgiques au sens strict, c'est à dire à l'évolution technologique, les productions étudiant de manière très partielle les « forêts métallurgiques ». D'un autre côté, se développe un autre courant de recherche portant principalement sur l'histoire des forêts. Dans ces recherches les activités proto-industrielles et industrielles sont toujours mentionnées, leur rôle sur les massifs forestiers est souvent caricaturé, pointant du doigt les « bouches à feux » comme étant responsables de la dégradation des forêts.
Ces deux approches ont longtemps été menées séparément.

2.2.1. Des études centrées sur l'histoire de la métallurgie

La production de métal joue un rôle important dans les sociétés. Eléments de parure, outils, armes, monnaies etc., les objets métalliques créés sont des témoins des évolutions technologiques mais également de richesse des différents groupes. « *Le fer entre dans l'outillage, la construction, l'armement, etc. Les usages du plomb et du cuivre sont considérables. L'argent est l'objet de l'attention des puissants* » (Bailly-Maitre, dans Burnouf *et al.*, 2008, p 108). Elément de richesse, de pouvoir, la production de métal se doit d'être analysée par les historiens.

Les études réalisées à ce jour portent principalement sur la métallurgie du fer, puisque les autres types de métallurgies (polymétalliques) sont peu renseignés dans les documents historiques. Pourtant, l'or, l'argent, le cuivre et le plomb sont des métaux précieux, ils ont fait l'objet d'écrits. Dans les « *dossiers d'histoire et d'archéologie* » de 1986 consacrés à l'archéologie et l'industrie, P. Braunstein explique en partie les difficultés pour étudier les métaux non ferreux. « *Les minerais de plomb et de cuivre argentifère ont suscité de tout temps un vif intérêt de la part des pouvoirs publics et par conséquent les sources écrites qui s'y rapportent sont relativement abondantes : statuts, règlements et ordonnances, privilèges et concessions, enquêtes et procédures […]. On est cependant loin de pouvoir retracer les phases d'or et d'argent en France, en raison de la dispersion des gîtes métalliques,*

aurières et laveries et de la disparition de la plupart des comptes d'exploitation et de prélèvement régalien » (Braunstein, 1986, p 18). Il semblerait que de nombreux documents d'archives aient disparu, rendant encore plus compliquée l'étude de ces métallurgies déjà difficile à aborder du fait de la dispersion des gisements polymétalliques. Ces minerais moins abondants dans les territoires, les zones d'ateliers sont rares, d'autant plus qu'en raison du grand nombre de métaux à étudier les recherches semblent se disperser. L'or, l'argent, le cuivre, le plomb, le zinc *etc.* ont une histoire différente, des procédés adaptés à chacun, rendant l'étude bien plus complexe sur le plan de l'histoire des techniques.

Contrairement à la métallurgie des non-ferreux, la sidérurgie du fer présente de nombreux avantages la rendant peut être plus accessible aux approches historiques. Répandue sur les territoires, du fait d'une large répartition des gisements de minerai ferrugineux, les outils en fer sont de plus très prisés car ils sont plus efficaces et plus résistants, un grand avantage pour les outils agricoles mais également pour l'armement. A cela s'ajoute une importante évolution technique. Pour la réduction du minerai, on passe de petits ateliers réduisant le minerai dans des bas fourneaux au stade ultime de l'évolution avec la réduction indirecte en hauts fourneaux. Enfin, la sidérurgie, et principalement celle des Temps Modernes et de l'Epoque Contemporaine, a laissé de nombreuses traces écrites. En effet, les maîtres de forges doivent rendre des comptes aux autorités, payer leurs ouvriers, payer d'importantes quantités de matières premières, tous ces actes laissent des traces écrites.

Attestée vers 1100 av. J.C. dans le monde méditerranéen et vers 800 à 700 av JC dans le nord de l'Europe, la réduction du minerai de fer est réalisée dans des bas foyers appelés bas fourneaux. La fin du Moyen Age constitue un tournant important dans l'histoire de la métallurgie du fer, puisque les bas fourneaux, structures temporaires, se transforment progressivement en véritables usines implantées à proximité des cours d'eau, employant l'énergie hydraulique pour actionner dans un premier temps les marteaux puis les soufflets (Mohen, 1990). La technologie de la réduction « directe » qui produisait une masse de fer que l'on pouvait forger, se transforme progressivement pour atteindre le stade de la réduction « indirecte ». Dès lors, la production de fer nécessite deux étapes : la production d'une gueuse de fonte, qu'il faut ensuite retravailler dans des affineries pour en retirer le carbone présent en excès et rendant la fonte très cassante.
De structures légères implantées au cœur des forêts et se déplaçant au gré des zones de production de charbon de bois, on passe à des complexes industriels bâtis, nécessitant

d'acheminer le combustible et le minerai jusqu'au lieu de réduction. Ces évolutions technologiques entraînent des changements dans l'implantation des activités dans le territoire, ce qui conduit à une évolution des stratégies d'approvisionnement en combustible.

Dès les débuts du XXe siècle, quelques historiens se sont intéressés à la question de la sidérurgie. Le plus ancien à proposer une synthèse de l'histoire de la métallurgie du fer est J. Levainville. Dans son ouvrage, « l'industrie du fer en France » (Levainville, 1922), l'auteur présente l'histoire de la sidérurgie, mais son propos porte essentiellement sur la réduction indirecte et notamment celle réalisée au charbon de terre. Les quelques pages consacrées à la métallurgie au bois présentent des données éparses de quantités de bois et de charbon de bois nécessaires au fonctionnement des fours, sans faire référence aux sources.
A la même période, on retrouve les travaux des frères Bourgin qui publient un ouvrage « *L'industrie sidérurgique en France au début de la révolution* » (Bourgin, 1920). Ils y regroupent les données de production de l'ensemble des forges françaises pour l'année 1788. Pour cela les auteurs ont repris l'ensemble des données de l'enquête de 1788 ordonnée par Dietrich au bureau du Commerce.

On retrouve différents ouvrages construits sur le même principe, regroupant des données statistiques. Celui de E. Peyronnet porte sur les forges en Périgord : « *Les anciennes forges du Périgord* » (Peyronnet, 1958). Cette fois-ci, l'auteur présente non seulement les quantités de production, mais on retrouve également les quantités de matières premières ainsi que leur prix. Dans ce catalogue on retrouve trois années particulièrement bien renseignées sur un grand nombre de forges (1788, 1789 et 1811).
Enfin, le dernier catalogue réalisé à partir des données statistiques des enquêtes générales est celui de B. Gilles : « *Les forges française en 1772* » (Gille, 1960).
Ces travaux de compilation de données offrent des documents de travail faciles d'accès pour les recherches sur les productions françaises. Toutes les productions sont classées par secteurs géographiques et les quantités indiquées sont toutes homogénéisées. Cet avantage peut s'avérer être un problème pour une analyse fiable. En effet, sans l'information originelle, c'est à dire la donnée inscrite sur les archives, il est difficile d'évaluer la fiabilité des conversions. Les systèmes métriques changeant radicalement d'une région à l'autre mais également au cours du temps, il est difficile d'assurer la justesse du travail de conversion. Cela reste l'inconvénient majeur à travailler sur des documents de « seconde main ».

Dans les années 1980, de nombreux auteurs traitent de la métallurgie du fer en haut fourneau pour les Temps Modernes et contemporains. Chacun d'eux tentent de retranscrire les relations étroites qui existaient entre la sidérurgie et les espaces forestiers.
Prenons l'exemple du travail de F. Dornic, « *Le fer contre la forêt* » (Dornic, 1984). Malgré son titre évocateur, l'ouvrage est finalement centré sur le fonctionnement des hauts fourneaux dans l'ouest de la France. Les références à la forêt se résument à des quantités de charbon de bois, parfois des surfaces de bois, ce qui est finalement assez décevant.
Les travaux de Y. Lamy « *Hommes de fer en Périgord au XIXe siècle* » sont beaucoup plus problématisés pour répondre à la question des « forêts métallurgiques ». Cette approche sociologique prend non seulement en compte les conditions des salariés dans les usines mais également le rôle de cette industrie dans l'organisation socio-économique. Pour cela, il replace les activités sidérurgiques du Périgord dans leur contexte environnemental tout en montrant la place fondamentale qu'occupaient les forêts dans le fonctionnement industriel (Lamy, 1984, 1987). Le focus fait sur la forge de Savignac Lédrier, dernière forge à fonctionner au charbon de bois en Périgord, esquisse l'organisation et les stratégies mises en place pour s'approvisionner en combustible.

Les travaux de J.Y. Andireux sur la sidérurgie bretonne : « *forges et hauts fourneaux en Bretagne du XVIIe au XIXe siècle*. » (Andrieux, 1987), « *Les travailleurs du fer* » (Andrieux, 1991) apportent également de nombreuses informations. Un travail d'étude d'archives important le mène à retracer l'histoire de certaines usines de façon très détaillée, avec à l'appui des données sur la matière première et la production. Dans le premier ouvrage, l'auteur consacre un chapitre entier à l'exploitation des forêts mais, même si les données sont particulièrement intéressantes, cela ne représente que dix pages sur l'ensemble de l'ouvrage, dont quatre expliquent la production de charbon de bois. On y trouve des évaluations très précises des surfaces boisées coupées par an pour produire le charbon de bois pour différentes forges alors que les mentions sur la physionomie des forêts exploitées sont rares. Même si l'on parle de « saccage des futaies » cela ne restitue pas l'image des « forêts métallurgiques » de Bretagne.

A ce jour, le plus grand nombre de recherches réalisées sur la sidérurgie en hauts fourneaux se concentre sur le nord de la France, en Bretagne comme nous venons de l'évoquer mais également en Lorraine, en Bourgogne et en Franche Comté (Belhoste et Lecherbonnier,

1991 ; Belhoste, 1992 ; Belhoste *et al.*, 2003). Néanmoins on retrouve quelques études plus éparses dans la moitié sud de la France, avec le Périgord, les Alpes, et les Pyrénées (Dejean, 1927 ; Lamy, 1987 ; Doyen et Malinverno, 1988 ; Dubois et Pizano, 1999). Une fois encore, on constate que la part consacrée au combustible et à la forêt est restreinte. On ne peut pas dire que celle-ci soit oubliée mais il semblerait qu'elle manque d'approfondissement. Les recherches sont soit des monographies par forge, conservant les unités de mesures d'origine, ce qui rend très délicat les comparaisons entre forges, entre secteurs, compliquant ainsi les estimations de surfaces boisées nécessaires, soit des catalogues de quantités de production pour une année donnée.

Dans cet historique des recherches sur la métallurgie du fer, il ne faut pas oublier les travaux portant sur la réduction directe. Principalement centrés sur l'époque médiévale, ces travaux nécessitent des méthodes bien différentes de celles de l'historien moderniste ou contemporanéiste. Il s'agit de textes médiévaux en vieux français ou en latin, qui exigent d'autres compétences.

Les travaux de M. Arnoux en sont d'ailleurs la preuve. « *Mineurs, ferons et maîtres de forge, étude sur la production du fer dans la Normandie du Moyen Age, XI-XVe siècles.* » (Arnoux, 1993) montre bien la possibilité d'étudier des périodes plus anciennes à partir des textes. L'auteur retrace l'histoire de la sidérurgie en Normandie, des bas fourneaux jusqu'aux hauts fourneaux. Il présente le développement des moulins de fer qui emploient la force hydraulique pour actionner les marteaux puis les soufflets, changeant radicalement l'organisation du territoire. Cette étude expose de façon claire et détaillée les évolutions technologiques. En revanche, une fois de plus la question du combustible n'est que partiellement abordée ; elle ne représente qu'une petite dizaine de pages dont plus de la moitié est consacrée à l'explication de la carbonisation en meule.

Pour les moulins de fer, Verna a conduit les recherches les plus approfondies. Dans son ouvrage «*Le Temps des moulines. Fer, technique et société dans les Pyrénées* » (Verna, 2001). L'auteur développe largement les aspects techniques de ces moulins à battre le fer. Fondée principalement sur des sources laïques, cette étude tend à montrer que cette technologie consommait beaucoup plus de charbon que des simples bas fourneaux, entrainant ainsi une exploitation intensive des forêts pyrénéennes. Elle rapporte quelques textes témoignant de

pratiques restrictives, allant jusqu'à la spécialisation et à la gestion raisonnée des espaces boisés. L'auteur attribue à la forge hydraulique la naissance de la culture de la forêt dans les Pyrénées. Des forêts entières seraient alors gérées pour produire le combustible nécessaire au fonctionnement des fourneaux. Il s'agit bien ici de « forêts métallurgiques ».

Parmi ces stades évolutifs de four de réduction directe, ce sont les forges à la Catalane qui ont laissé le plus de traces écrites. On retrouve d'ailleurs de nombreuses études à ce sujet, toujours dans le secteur des Pyrénées (Dubois, 1991 ; Bonhôte, 1994 ; Izard, 1999 Cantelaube, 2002 ; Dubois, 2004).

2.2.2. Des études centrées sur la forêt

Nous venons de le voir, les « forêts métallurgiques » sont abordées de façon très partielle par les historiens spécialisés sur la métallurgie. Parallèlement, d'autres historiens s'intéressent plus particulièrement à l'étude de la forêt.

L'histoire des forêts a de tout temps était au cœur des questions sociétales. Comme le dit R. Viney, dans la préface de « *l'histoire des Forêts* » de M. Devèze en 1973, « *il n'est pas de domaine où nous vivions plus du passé que dans celui de l'économie forestière. Ce que nous récoltons aujourd'hui en forêt est le fruit de longues préparations et d'investissements faits sous forme de plantations ou d'économies par nos ancêtres et respectés pendant plusieurs générations* » (Devèze, 1973, p 7). Mais finalement, pendant longtemps, le rôle combustible de ces forêts n'est que peu évoqué. Les premiers travaux s'appliquent à comprendre l'évolution des villes, des surfaces agricoles et redessinent en négatif les contours des anciennes forêts sans chercher à connaître leur composition, ni leur état et le rôle qu'elles jouaient dans les sociétés.

Les années 1980 marquent non-seulement un tournant dans l'étude des forêts mais également dans l'étude des forêts combustibles. La table ronde organisée par D. Woronoff en février 1980 autour du thème « *Aspects de la recherche sur l'histoire des forêts françaises* » est probablement l'élément déclencheur. Cette réunion a été l'occasion de faire un état des lieux des recherches et G. Bertrand, par ses propos un peu rudes, met en avant les faiblesses des recherches sur l'histoire de la forêt. D'après lui « *les historiens*

ne se sont vraiment intéressés à la forêt que lorsqu'elle était défrichée ». Ces propos ont été qualifiés d'abord d'«*abruptes* » et « d'*injustes* » car selon les membres de cette table ronde *« les travaux d'histoire forestière n'ont jamais manqué. […] La forêt n'est pas vide d'historiens.* ». Néanmoins sa remarque a été prise en considération, les membres de cette réunion accordant que *« l'école historique française a contourné les forêts. Les labours et les parcours ont bénéficié d'une forte densité de recherches, tandis que le troisième élément constitutif de l'espace rural est resté méconnu, sous estimé.* » (Groupe d'Histoire des Forêts Françaises, 1982, p 2)

C'est à partir du constat fait par G. Bertrand que quelques historiens, géographes sociologues réunis autour de D. Woronoff et G. Bertrand se rassemblent pour travailler sur l'histoire des forêts. Pour cela, ils créent le Groupe d'Histoire des Forêts Françaises (GHFF) en 1981. Désormais la forêt est considérée comme un objet d'étude et non pas comme un élément annexe de l'étude des territoires. On observe un tournant dans la façon d'aborder la question de la forêt, problématisant les recherches autour de thématiques bien précises, comme « forêt et chasse », « forêt et pastoralisme », « forêt et ville » ou encore « forêt et métallurgie ».

Avant cette date, on ne connaît que deux auteurs proposant une étude assez complète de l'histoire des forêts, mais dans ces travaux l'impact des activités métallurgiques n'est que très rapidement évoqué.

Georlette, ingénieur en agronomie, s'est attaché à restituer l'histoire des forêts françaises depuis la fin du Moyen Age jusqu'à la Révolution (Georlette 1957 a, b). A partir des ordonnances royales, des comptes-rendus des maitrises des eaux et forêts et des ouvrages des scientifiques du XVIIIe siècle, l'auteur propose une véritable chronologie de la gestion des forêts montrant les évolutions des modes de gestion : transformation des forêts de hautes futaies en taillis sous futaies, voire même en taillis monospécifiques. Cette évolution des sylvofaciès est ponctuée de dates clés comme celles des ordonnances royales régissant en partie les modes de gestion sylvicole. Le rôle joué par les activités métallurgiques est abordé mais de façon très succincte, prenant juste quelques exemples d'espaces forestiers surexploités pour alimenter les forges. *« Le développement de certaines industries dévoreuses de bois (forges, salines, verreries, tuileries, papeteries etc.) fit accroitre la demande en produits ligneux. Le bois qui jusque là n'avait été que le produit accessoire*

d'une forêt dispensatrice d'utilité spontanée devint le produit principal. Malheureusement la satisfaction des exigences industrielles aboutit au même résultat que l'exercice immodéré des droits d'usage : elle ruina les surfaces boisées » (Georlette, 1957 a). *L'*auteur évoque également la mise en place de modes de gestion imposés pour répondre à la demande : « *L'industrie métallurgique dont l'essor fut prodigieux, réclamait des quantités énormes de charbons de bois que, seuls, des taillis pouvaient livrer* » (Georlette, 1957 b).

Plus détaillés, les travaux de M. Devèze, avec notamment son ouvrage en deux tomes « *La vie de la forêt française au XVIe siècle* », mettent en évidence le rôle majeur des forêts dans le fonctionnement socio-économique français (Devèze, 1961). Ces recherches aux Archives Nationales le mène à retracer l'évolution des surfaces forestières par région et de retrouver les types de peuplement et les modes de gestion sylvicole. Dans son travail, l'auteur retranscrit également les changements de perception par les populations sur les massifs boisés en faisant le point sur les différentes activités humaines qui influençaient les massifs (élevage, chasse, industrie, flottage du bois etc.). Centré sur une période charnière de l'histoire des forêts françaises, entre l'ordonnance de François 1er en mars 1516 et la réorganisation de la table de marbre du 6 avril 1601 sous Henri IV, il tente d'expliquer les tenants et les aboutissants de la « crise du bois » qui semble jouer un grand rôle dans l'histoire de la France. En effet, celle-ci est à l'origine de nombreux conflits d'usage entre ruraux, urbains et industriels. On entrevoit ici le rôle fondamental joué par les activités métallurgiques dans les surexploitations forestières. L'auteur détaille même les principales régions productrices de fer en France en présentant la sidérurgie comme l'un des facteurs responsables de « *la crise des forêts françaises dans la première moitié du XVIe siècle (1515-1559)* » (Devèze, 1961). Si la métallurgie est accusée de dégrader les forêts, en revanche on ne trouve pas dans cet ouvrage de réels ratios entre quantité de métaux produits et superficie de bois nécessaire à ces productions. L'estimation de l'impact des activités métallurgiques sur le couvert forestier à cette époque reste encore délicate. L'information sur les forêts métallurgiques est finalement noyée parmi l'ensemble des facteurs agissant sur les forêts françaises.

Après 1980, historiens, géographes, sociologues s'emparent donc de la forêt comme objet d'étude. A. Corvol, historienne au CNRS en fait son objet d'étude de prédilection et écrit de nombreux ouvrage sur ce sujet. Par exemple : « *L'Homme et l'Arbre sous l'ancien Régime* »

(Corvol, 1983), « *L'Homme aux bois* » (Corvol, 1987), « *Tempêtes sur la Forêt Française* » (Corvol, 2006). L'approche très historique développée par l'auteur dépeint les différents visages des forêts aux cours des quatre derniers siècles, insistant sur le rôle fondamental joué par celles-ci dans le développement des sociétés humaines. L'auteur évoque notamment dans « *L'Homme au bois* » la question de l'impact des activités métallurgiques sur le couvert forestier. Dans le chapitre consacré « *aux nouveaux propriétaires* », le rôle dévastateur de la sidérurgie est largement évoqué pour le XVIIIe siècle, le sous-titre « *l'industrie dévoreuse* » est assez évocateur. Données chiffrées à l'appui, l'auteur explique la hausse du prix du bois, les raisons des « *crises forestières* » ainsi que l'origine de la dégradation des forêts.

J.P. Husson (Géographe, université de Nancy) traite également de ces questions dans son ouvrage « *Les forêts françaises* » (Husson, 1995). L'auteur aborde la question de la forêt sous les aspects économiques actuels tout en replaçant les forêts françaises dans leur dimension historique. Il évoque « trois âges » dans l'histoire des forêts françaises. De la forêt nourricière, on passe à une forêt réglée pour répondre aux différentes demandes en bois pour le chauffage, la construction ou bien encore pour alimenter les activités artisanales et industrielles. Le troisième temps est appelé par l'auteur « *la forêt restaurée* », utilisée principalement pour le loisir et la préservation d'espaces de nature. C'est le deuxième âge qui nous intéresse tout particulièrement. Le titre « *des usines à feu prédatrices ou protectrices* » met bien en perspective le rôle ambigu que jouent les forges aux Temps Modernes sur le couvert forestier. « *Les usines à feu ont imposé la création de forêts nouvelles, privatives, accordant la priorité aux choix de gestion. Elles ont permis la pérennité de vastes massifs abornés. Elles furent souvent implantées dans des régions peu peuplées et étaient alors le meilleur moyen de valoriser du matériel ligneux jusque-là inexploité. […] Les usines ont une influence néfaste sur l'état des bois si une part croissante de leur besoin provient de récoltes réalisées en dehors de leur affectation* » (Husson, 1995, p 133).

Le travail de Garnier, « *Terre de conquêtes* » (Garnier, 2004) se doit d'être cité ici. L'auteur y présente une étude très détaillée de l'histoire des forêts vosgiennes sous l'Ancien Régime, montrant les différentes activités influençant les évolutions des massifs forestiers. E. Garnier consacre un chapitre aux industries dévoreuses de bois. Au côté des verreries, les activités métallurgiques prennent une large place dans l'exploitation des massifs forestiers, on parle de « *gouffres métallurgiques* ». L'étude est détaillée et bien argumentée sur la base

de dépouillement d'archives. En revanche on peut, une fois de plus, regretter l'absence d'estimation des espaces boisés nécessaires au fonctionnement des « *bouches à feu* » rendant impossible une analyse quantitative.

Cette dualité entre études centrées sur la métallurgie et études centrées sur la forêt est tout de même moins marquée pour les historiens analysant l'histoire des forêts. En effet, ces derniers intègrent beaucoup plus facilement le rôle des activités métallurgiques dans l'évolution des massifs forestiers. En revanche, pour étudier les «forêts métallurgiques » dans leur globalité, il faut donc mener des approches spécifiques à ce sujet.

2.2.3. Quand les « forêts métallurgiques » font l'objet d'études spécifiques

L'ouvrage dirigé par D. Woronoff « *Forges et forêts, recherches sur la consommation proto-industrielle de bois* » (Woronoff, 1990) dresse le mieux une synthèse des différents travaux réalisés en France. Même si le terme « forêt métallurgique » n'est pas employé, une grande partie des contributions redonnent une place importante à la forêt dans l'histoire de la métallurgie et principalement dans le cas de la métallurgie du fer. Les contributions s'attachent à étudier la relation entre métallurgie et forêt à partir de différents types de sources.

L'étude des cahiers de doléances proposée par A. Brosselin, A. Corvol et F. Vion-Delphin dans « *Les doléances contre l'industrie* » (Brosselin *et al.*, 1990) aborde la question des forêts métallurgiques d'un point de vue sociétal. Les plaintes témoignent d'une augmentation excessive du prix du bois, de l'état « déplorable » des forêts et toutes rendent responsables les activités sidérurgiques. Même si l'analyse de documents issus de conflits est souvent biaisée par la position des plaignants, cette étude a le mérite de replacer les activités sidérurgiques dans un contexte sociétal.

Dans cet ouvrage, on trouve également une importante contribution de Boissière « *La consommation parisienne de bois et les sidérurgies périphériques : essai de mise en parallèle (milieu XVe - XIXe siècles)* » (Boissière, 1990). L'auteur présente une estimation des volumes de bois prélevés pour l'utilisation de la ville de Paris qu'il met en relation avec la consommation de bois par les hauts fourneaux situé en périphérie de la capitale. Cette

approche explique les raisons qui conduisent les autorités à interdire toute construction des forges à proximité de forêts pouvant être destinées à approvisionner la ville par voie terrestre ou par voie d'eau.

La question de la consommation en bois par les forges et l'impact de ces activités sur le couvert forestier est également très bien exprimée dans la contribution de Denis Woronoff « *la politique des autorisations d'usines et la question du bois* » (Woronoff, 1990) et de Belhoste « *Une sylviculture pour les forges, XVIe - XIXe siècle* » (Belhoste, 1990). Les auteurs s'appuient sur de nombreuses données quantitatives pour estimer les surfaces boisées et pour retrouver les modes de gestion mis en place pour répondre à la demande en combustible pour les établissements sidérurgiques. De nombreux exemples de massifs forestiers illustrent leurs propos et rendent concrètes les interprétations proposées.

Ce travail de synthèse principalement centré sur la réduction indirecte est tout de même complété par quelques recherches portant sur la réduction directe. Arnoux développe dans sa contribution, « *Forges et forêts au Moyen Age, l'exemple normand* » (Arnoux, 1990), les données qu'il a obtenu par l'analyse de textes médiévaux portant sur la réduction du fer dans des « moulins de fer », bas fourneaux associés à une forge à battre hydraulique. Principalement centrée sur la technique de réduction, cette étude met tout de même en évidence le lien étroit entre la gestion des massifs boisés et l'organisation des activités métallurgiques. A cette approche s'ajoute également le travail de Bonhôte et de Fruhauf sur les forges à la catalane dans les Pyrénées : « *La métallurgie au bois et les espaces forestiers dans les Pyrénées de l'Aude et de l'Ariège* » (Bonhôte et Fruhauf, 1990). Les auteurs proposent une restitution assez précise de l'organisation des massifs forestiers alimentant ces forges et ils rapportent également des phases d'activités métallurgiques importantes ayant conduit à une surexploitation de certains massifs boisés.

Cet ouvrage rassemble donc des travaux très enrichissants et tente de développer une approche intégrée entre métallurgie et forêt. Ces contributions sont richement documentées pour la métallurgie du fer et cela pour les périodes les plus récentes, Temps Moderne et Epoque Contemporaine. A ce jour, ce genre d'approche est encore peu développée pour la métallurgie des non ferreux et encore moins pour les périodes antérieures à l'époque Médiévale (Py, 2009).

Plus on remonte dans le temps plus les documents d'archives se font rares (Braunstein,

1986). De plus, même en présence de nombreux écrits, la subjectivité des sources écrites doit toujours être évaluée par l'historien. Il est donc important de trouver d'autres moyens pour obtenir des informations. Les recherches en archéologie sont une excellente façon de découvrir le fonctionnement des ateliers, peu ou pas décrit dans les textes.

Les vestiges d'ateliers métallurgiques et les ruines des complexes industriels offrent à l'archéologue un matériel privilégié pour comprendre le fonctionnement des fours, et pour étudier la provenance des matières premières et la destination des produits finis. Restes de parois de fours, scories, déchets métalliques ou encore charbon de bois, sont autant d'indices qui s'offrent à l'archéologue et à l'archéobotaniste.

3. L'archéologie et l'anthracologie, un autre moyen d'approcher les « forêts métallurgiques »

Le recours à l'archéologie, à l'archéobotanique ou encore aux approches paléoenvironnementales pour étudier les activités métallurgiques et la forêt a dans un premier temps été réalisé pour les périodes anciennes où les textes faisaient défaut (Cauuet, 1984 ; Domergue *et al.*, 1993 ; Leroy, 1993). C'est par l'étude des vestiges des ateliers et de leurs déchets que les approches ont commencé, négligeant souvent l'étude du combustible, alors que ces sites regorgent généralement de restes charbonneux. Jusque dans les années 1960, les approches historiques et archéologiques s'attachaient à travailler sur l'Homme sans nécessairement regarder dans quel environnement celui-ci évoluait. Si l'utilisation des approches archéobotaniques et paléoenvironnementales est couramment d'usage sur les sites archéologiques « plus classiques » comme les sites d'habitats, ces études se développent progressivement sur les sites métallurgiques. Aujourd'hui encore on trouve peu de publications traitant de façon exhaustive de la question du combustible.

3.1. L'archéométallurgie principalement centrée sur l'histoire des techniques

Parmi l'ensemble des disciplines développées en archéologie, l'archéométallurgie se met en place tardivement. « *L'archéologie minière et métallurgique n'est pas un domaine très fréquenté par les chercheurs. Elle est humble, pauvre, exigeante, difficile. Elle affectionne l'obscurité des galeries, la pénombre des forges, l'éclat noir des scories et la poussière des anciennes fonderies. Elle ne découvre pas de ces trésors qui attirent les foules* » (Domergue et Leroy, 2000). La découverte de structures encore conservées est relativement rare ; ce sont le plus souvent les zones de déchets (« ferriers », « plombières » etc. selon le type de métal produit), que recherchent les paléométallurgistes. Ces tas de scories offrent de grandes quantités d'informations et un nombre important d'objets à étudier. Scories piégées, coulées, en plaquettes ou encore en cordelettes font l'objet d'analyses très poussées empruntées aux Sciences de la Terre. Etudes géochimiques, isotopiques, analyses de lames minces sous microscope caractérise ainsi le type de métal produit, les procédés métallurgiques employés et surtout le type de minerai utilisé. Depuis une vingtaine d'années, les analyses chimiques

et isotopiques aidant, on voit se multiplier les études concernant la provenance des minerais et les échanges de métaux (Monna *et al.*, 2004 ; Baron, 2005 ; Cattin *et al.*, 2009). Grâce à ces recherches, relativement complexes, les archéologues peuvent retrouver l'origine des minerais, parfois même l'emplacement des gisements métallifères, permettant ainsi de comprendre les stratégies d'approvisionnement en minerai.

Par ailleurs, l'estimation des volumes de déchets permet aux archéologues de mesurer la production métallique, autorisant ainsi une évaluation des quantités de matières premières employées (minerais et charbons de bois) (Crew et Salter, 1991 ; Dieudonné-Glad, 2010). Pour y parvenir l'approche expérimentale est indispensable. Le centre d'expérimentation de Melle (Deux-Sèvres) réalise de nombreuses réductions traitant à la fois du minerai de fer et des non-ferreux. Lors des manipulations, les chercheurs quantifient un maximum de paramètres : volume de charbon, de minerai, évolution des températures etc. A partir de ces études, les paléométallurgistes proposent des ratios entre quantité de matière première, quantité de métal produit et proportion de déchets. Ces ratios renseignent sur l'impact des activités métallurgiques sur les espaces forestiers. En revanche, ce genre d'approche ne permet à aucun moment de retrouver la physionomie des forêts, ni même leur mode de gestion.

Les thématiques de recherche portant sur les activités métallurgiques sont nombreuses et largement diversifiées. « *Le champ de recherche est large et prend en compte l'ensemble des phénomènes liés à l'activité minière et métallurgique : les rapports de force politiques et économiques, les incidences sur le plan social, le flux de compétences, les grandes phases de mutations technologiques, le poids des données naturelles sur le déroulement de l'activité, l'impact de l'activité sur le paysage et l'environnement, etc. La connaissance de cette activité hautement stratégique dépend du croisement de sources différentes. L'histoire des techniques a tout à attendre de l'archéologie et de l'archéométrie* » (Bailly-Maitre, dans Burnouf *et al.*, 2008).

Pour permettre une approche la plus globale possible de l'histoire des métallurgies, les chercheurs se rassemblent en 1982 au sein d'une association la SAFEMM (Société Archéologique Française d'étude des Mines et de la Métallurgie). Historiens, archéologues, archéomètres se réunissent tous les ans pour discuter des différents travaux menés par les

équipes de recherche. Trente ans de recherches et de collaborations vont bientôt conduire à la réalisation d'un ouvrage collectif traitant des métallurgies, établissant ainsi un bilan des connaissances actuelles. Participant aux travaux de cette association, nous pouvons constater que la prise de conscience de l'importance d'étudier les forêts dans les études sur la métallurgie n'est que très récente et qu'il reste un important travail à accomplir sur la question des « forêts métallurgiques ».

Les recherches actuelles sont encore cloisonnées, dissociant les travaux miniers des recherches portant sur la réduction du minerai ou encore sur le travail du métal, étudiant de façon séparée les périodes chronologiques et donc les technologies et dissociant également la métallurgie du fer de la métallurgie des « non-ferreux »

3.1.1. La métallurgie du fer largement étudiée

Force est de constater qu'à la lecture des différents travaux la métallurgie du fer domine largement dans le nombre de fouilles réalisées (Domergue et Leroy, 2000).

Bon nombre de chantiers de fouilles sont conduits sur des sites de réduction directe en bas fourneaux pour les époques antiques et médiévales. Les sites se répartissent sur l'ensemble de la France :

- en Lorraine (Leroy et Merluzzo, 1999),
- en Bretagne (Vivet *et al.*, 2009),
- dans le Bas Maine (Sarreste, 2008)
- dans la Montagne Noire (Domergue, 2008),
- dans les Pyrénées (Dubois, 2000)
- dans les Alpes (Morin et Rosenthal, 2006)
- dans le Jura suisse (Eschenlohr et Serneels, 1991).

Mais les fouilles ne se limitent pas à des sites de bas fourneaux ; on retrouve également quelques fouilles sur des complexes industriels de réduction indirecte. La fouille de ces structures souvent encore en élévation était loin d'être évidente au premier abord, les textes étant si riches en informations, celle-ci paraissait inutile. Mais les travaux réalisés par P. Benoît sur la forge de l'abbaye de Fontenay (Benoit, 1986), par P. Peyre sur les forges

de Buffon en Bourgogne (Peyre, 1986) ou encore par C. Dubois et L. Pizzano sur la forge de Savignac-Lédrier en Dordogne (Dubois et Pizano, 1999) montrent tout l'intérêt d'une approche archéologique sur ces sites. La fouille a non seulement permis de vérifier les descriptions faites dans les textes mais également de mieux comprendre certains fonctionnements assez mal détaillés dans les différents ouvrages techniques.

L'ouvrage « *Le Fer* », dirigé par Mangin (Mangin, 2004), dresse un inventaire des techniques archéologiques et archéométriques pour étudier les vestiges des activités sidérurgiques et du potentiel de ces études. Centrées sur une méthodologie ou sur un type de site, les nombreuses contributions montrent la diversité des recherches conduites sur la métallurgie du fer en France. Parmi l'ensemble des spécialités mentionnées, l'approche archéobotanique n'est que très rapidement évoquée, et l'on regrette d'ailleurs le manque d'intérêt porté au combustible dans ces travaux.

3.1.2. La métallurgie des non-ferreux principalement centrée sur les techniques d'extraction du minerai

Même si la métallurgie du fer semble avoir fait l'objet de plus d'attention de la part des archéologues, les recherches en archéométallurgie portent également sur la métallurgie des non ferreux mais ces travaux semblent s'être plus orientés sur les procédés d'extraction du minerai plutôt que sur les procédés de réduction. « *A l'inverse du fer, elles [les recherches sur les non-ferreux] ont presque exclusivement concerné la technique d'extraction des minerais et n'ont que peu abordé les phases de traitement* » (Domergue et Leroy, 2000). Les fouilles des sites miniers d'argent, de cuivre ou d'or se multiplient aujourd'hui. On en retrouve dans les Alpes avec les travaux de M.C. Bailly-Maitre, B. Ancel, V. Py, de D. Morin dans les Vosges avec les recherches de P. Clerck, ou encore dans les Pyrénées avec J. Girard, dans le Massif Central B. Cauet a travaillé en Limousin ou dans le Morvan. Sur la bordure sud-est du Massif Central, dans les Cévennes, on retrouve également des études menées par M.C. Bailly-Maitre (Bailly-Maître, 1999, 2011 ; Morin et Rosenthal, 2006 ; Cauuet et Tamas, 2008 ; Py, 2009 ; Ancel *et al*. 2011 ; Clerc, 2011 ; Girard *et al*., 2011). On citera rapidement quelques travaux réalisés à l'étranger : ceux de P. Claughton dans le Devon en Angleterre, ceux de R.F et L. Dallai en Italie (Toscanie) ou encore ceux de C Tamas et B. Cauuet en Roumanie (Tamas *et al*., 2009 ; Claughton, 2010 ; Francovich et Dallai, 2010).

L'intérêt porté en particulier sur les sites miniers pour les métaux « non-ferreux » s'explique en partie par le faible nombre d'ateliers de réduction des minerais polymétalliques retrouvés en fouille. En effet, ces ateliers sont souvent dégradés, on ne retrouve que très rarement des structures de four encore en place. Quelques fouilles apportent tout de même des éléments de réponse (Bonnamour *et al.*, 2010). Le site de Brande en Oisans (Isère) offre probablement l'image la plus complète du fonctionnement de ces sociétés métallurgiques. Depuis maintenant trente ans, des fouilles sont réalisées sur ce village minier et métallurgique et pourtant la part des recherches consacrées au combustible reste faible (Bailly-Maître et Dupraz, 1979).

3.2. L'approche anthracologique peu développée sur les sites métallurgiques

Le bois étant au cœur de la chaîne opératoire dans les activités minières et métallurgiques, l'analyse des restes ligneux sur les sites archéologiques permet d'obtenir de précieuses informations sur les questions d'approvisionnement en combustible. Le bois débité en bûches, utilisé dans les mines pour l'abattage par le feu, comme le charbon de bois utilisé dans les fours pour la réduction ou le travail du métal, laissent des restes carbonisés sur les sites archéologiques. L'analyse anthracologique par la détermination taxonomique et l'estimation du diamètre des bois sur ces vestiges étudient de près la végétation arborée.

Cependant, les quelques analyses anthracologiques réalisées à ce jour sur les sites métallurgiques et n'ont que très rarement été publiées. De plus les rares études anthracologiques portent essentiellement sur des sites de métallurgie du fer.

L'étude la plus ancienne date des années 1970. La fouille d'une batterie de bas fourneaux datant de l'antiquité a fait l'objet d'une étude anthracologique très poussée (Pelet *et al.*, 1973 ; Pelet, 1993). F. H. Schweingruber a étudié 1207 fragments de charbons de bois en combinant détermination taxonomique et estimation du diamètre des bois. L'estimation du diamètre était rarement appliquée sur les sites archéologiques à cette époque et n'est pas encore aujourd'hui une méthodologie couramment employée, ces éléments font de ce site de réduction du fer en bas fourneau une étude unique en terme d'étude archéobotanique.

Dans les années 1990, on retrouve quelques publications de paléométallurgie dans lesquelles figurent des données anthracologiques. Nous pensons notamment aux travaux de C. Dunikowski qui présentent en deux pages les résultats de l'analyse des charbons de bois prélevés dans les différents niveaux du site de réduction. Si la démarche est intéressante, on peut néanmoins regretter le manque d'intégration de ces données à la réflexion générale dans l'organisation du site et de son implantation dans le paysage (Dunikowski et Cabboi, 1995).

Les travaux conduits également dans les Pyrénées à la même période renforcent dès lors la démarche de l'étude archéobotanique, la fouille des ateliers de réduction fait l'objet de prélèvement pour réaliser des analyses anthracologiques (Dubois, 1992 ; Izard, 1999). Mais finalement c'est en sortant des sites métallurgiques que les auteurs ont pu accéder à une véritable restitution des espaces forestiers.

Les travaux de N. Dieudonné Glad dans l'ouvrage collectif *« travail de la terre, travail du fer »* quant à eux donnent une plus grande place aux analyses anthracologiques réalisées au sein des structures d'atelier. Près de 1400 charbons ont été déterminés sur le site d'Ouche, avec une analyse allant au delà de la simple étude taxonomique, puisque le nombre de cernes par charbon a également été relevé ainsi que les périodes d'abattage des arbres. Ces indicateurs permettent d'apporter des informations sur les modes de gestions, sur les saisons d'activités (Dieudonné-Glad, 2010).

Ces quelques exemples d'applications anthracologiques sur des sites métallurgiques ne sont aujourd'hui plus seuls. Quelques travaux d'étudiants en Master comme ceux de R. Marque, de K. Queuille ou encore de G. Rassat, montrent tout l'intérêt de développer ce genre de démarche sur l'ensemble des sites métallurgiques (Marque, 2007 ; Queuille, 2011 ; Rassat, 2011, 2012).

Les recherches en archéométallurgie des « non-ferreux », plus récentes que celles réalisées sur la métallurgie du fer, présentent un nombre de sites étudiés beaucoup plus faible et comme pour la métallurgie du fer, l'étude du combustible semble également avoir été mise de côté.

Nous l'avons vu, les recherches portant sur la métallurgie des « non-ferreux » se sont le plus souvent intéressées aux techniques d'extraction du minerai, les vestiges des ateliers étant le plus souvent très dégradés. Le bois employé dans les mines, comme bois d'œuvre pour étayer les mines, comme combustible pour l'abattage des parois par le feu, laisse de nombreux restes dans les galeries de mines. Pourtant, pendant longtemps les prélèvements anthracologiques ne sont pas réalisés lors des fouilles des mines. Cela s'explique peut être par les conditions de fouilles difficiles ; il faut désobstruer les galeries avant d'atteindre les sols d'activités.

V. Py dans sa thèse a mis en place des protocoles de prélèvements permettant de développer des études anthracologiques dans les contextes miniers. En croisant approches historiques, fouilles archéologiques et analyses anthracologiques, l'auteur retrouve l'image des forêts exploitées pour ces activités dans la vallée de la Haute Durance. Ce travail très poussé associe des catégories de bois (diamètre et âges) pour les différentes opérations minières. Principalement centrées sur l'abattage par le feu et sur les bois de mines, l'étude fondée sur un corpus de charbons et de bois relativement important appréhende es différentes essences de bois brûlés, la chaîne opératoire technique et la forêt (Py, 2006, 2009). L'étude, principalement centrée sur l'abattage par le feu, offre un corpus de charbons relativement important permettant ainsi de retrouver les différentes essences de bois brûlés (Py, 2009). Mais centrés sur les mines, les paysages forestiers restitués correspondent aux « forêts minières », reste à étudier les « forêts métallurgiques » à travers l'analyse des plateformes de charbonnage partiellement connues dans ces travaux.

3.3. Sortir des sites archéométallurgiques pour étudier les forêts

L'analyse anthracologique sur site archéologique doit être à l'avenir plus développée pour étudier de façon approfondie le combustible employé par les métallurgistes. L'information obtenue se résume à une moyenne des différents arrivages de charbon de bois sur le site de réduction. Si les métallurgistes s'approvisionnent sur plusieurs versants, dans plusieurs forêts ou dans différentes vallées, la végétation restituée par l'anthracologue correspondra à une moyenne de l'ensemble de la végétation exploitée.

Pour obtenir une image plus précise des forêts, mais également de l'ensemble de la végétation environnante, il est intéressant de sortir des sites archéologiques, métallurgiques ou miniers.

3.3.1. Les plateformes de charbonnage, un indicateur très précis pour étudier les forêts métallurgiques

Les recherches dirigées par G. Jalut et J.P. Métailier, dans le cadre du programme PIREN (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement) proposent un travail très précis sur la restitution des « forêts métallurgiques ». Ce programme intitulé « *La forêt charbonnée dans les Pyrénées Ariégeoises* » réunissait de nombreux chercheurs aux profils très différents. Historiens, archéologues, géographes, archéobotanistes ou encore paléoenvironnementalistes ont travaillé ensemble pour comprendre l'impact de la métallurgie du fer sur le couvert végétal. En développant une méthodologie adaptée à la problématique des « forêts métallurgiques », les auteurs ont réussit à retracer les dynamiques de végétation sur près deux millénaires (Métailié et Jalut, 1991).

Dans cet important travail, J. Bonhôte, V. Izard et B. Davasse ont choisi de travailler sur des vestiges jusqu'alors ignorés des recherches archéologiques : les plateformes de charbonnage. Ces sites archéologiques très particuliers, retrouvés en forêt ou encore hors forêt, sont d'excellents indicateurs pour étudier la forêt charbonnée à la fois de façon spatiale, temporelle ou encore botanique. En effet, les sites de transformation de charbon de bois étant généralement implantés en plein cœur des massifs forestiers, leurs vestiges sont des témoins directs de présence forestière par le passé. Grâce à leur localisation, il est alors envisageable de redessiner les anciens contours forestiers. Retrouvées hors forêts, les plateformes de charbonnage contribue à retracer les anciennes limites supérieures des massifs forestiers (Bonhôte, 1994 ; Izard, 1999 ; Davasse, 1999).

Dans un premier temps, c'est l'information spatiale qui avait été retenue par les chercheurs (Bonhôte, 1998 ; Izard, 1999) mais très rapidement ils se sont rendus compte de l'important potentiel de ces vestiges. En effet, ces vestiges riches en charbons restituent dans certains contextes différentes phases de carbonisation. Les plateformes de charbonnage permettent à la fois d'établir une chronologie des phases de charbonnage par les datations

au carbone 14 mais également d'identifier les essences qui ont été charbonnées. Dès lors, des analyses anthracologiques sont menées sur ces sites, les résultats obtenus sont particulièrement pertinents puisqu'ils restituent de façon très précise, à l'échelle de la parcelle même, l'image des bois exploités pour produire du charbon de bois.

Cette démarche menée sur les plateformes de charbonnage a par la suite été réemployée. On retrouve des études très similaires en Languedoc (Fabre, 1996), en Forêt Noire (Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Ludemann, 2002, 2010 ; Ludemann *et al.*, 2004) où se côtoient sites métallurgiques et plateformes de charbonnage.

Les plateformes de charbonnage, objets d'études privilégiées pour étudier les forêts combustibles donc les « forêts métallurgiques » seront au centre de nos recherches. Nous verrons par la suite comment aborder ces sites et la quantité d'informations qu'ils peuvent apporter aux géographes, aux anthracologues mais également aux historiens.

3.3.2. Les tourbières, des milieux enregistreurs des événements métallurgiques

Les tourbières, ces milieux humides, renferment également de précieuses informations pour l'histoire des activités métallurgiques et des forêts. Les analyses polliniques réalisées sur les séquences de tourbe permettent d'étudier de façon précise l'évolution de l'ensemble de la végétation au cours du temps. Phases de croissance ou de recul de la forêt peuvent ainsi être identifiées. Ces fluctuations s'expliquent par les variations climatiques ou bien par les activités humaines. Les activités métallurgiques, « gourmandes » en charbon de bois, sont souvent associées aux diminutions drastiques des pollens arboréens.

La combinaison de ces études à des analyses géochimiques permet depuis une dizaine d'année d'apporter de nouvelles informations. Chaque échantillon étudié par le palynologue peut faire également l'objet de dosage des différents éléments chimiques et même d'analyses isotopiques. Grâce à ces analyses chimiques, des courbes de concentration en polluants métalliques sont établies. Lorsque de fortes diminutions de pollens arboréens se corrèlent avec des pics de pollution au plomb par exemple, cela peut être associé à une phase d'activité métallurgique importante. Dans le Morvan autour du site de Bibracte, capitale des Eduens,

(Monna *et al.*, 2004 ; Jouffroy-Bapicot, 2010), en Lozère (Baron, 2005 ; Pulido Avila, 2006) ou bien encore dans les Pyrénées (Galop *et al.*, 2006) ce genre de résultats a été observé. Ces études paléoenvironnementales mettent en évidence des phases d'activités métallurgiques alors qu'aucun vestige archéologique n'a encore été identifié.

Pour confronter l'évolution de la végétation aux activités humaines, les analyses polliniques peuvent également être croisées avec des sources historiques. J.C. Oillic a mené cette démarche pour des tourbières situées à proximité de la forêt de Paimpont. Le résultat est assez surprenant car pour les Temps Modernes, période où les hauts fourneaux fonctionnaient à plein régime en Bretagne, les diagrammes polliniques ne permettent pas d'identifier de forêts. La surexploitation de la forêt, avec un temps de rotation entre les coupes trop rapproché, aurait conduit à réduire la pluie pollinique, les arbres étant trop jeunes. La présence de la forêt de Paimpont est, dans le cas de cette étude, uniquement identifiée par l'approche historique et l'analyse des plateformes de charbonnage (Oillic, 2011).

Conclusion

La grande diversité des sources à disposition des chercheurs rend complexe une étude globale des « forêts métallurgiques ». Une analyse complète et approfondie de ces forêts nécessite la mise en place d'approches croisées, de recherches interdisciplinaires et transdisciplinaires. L'approche historique, quand les sources écrites le permettent, autorise parfois une restitution assez fine de l'image des forêts ; espèces arborées, modes de gestions et état des forêts sont parfois mentionnés. En revanche, la représentativité de ces sources reste délicate ; le document écrit est souvent considéré comme subjectif. L'historien doit donc définir la fiabilité des différentes sources pour retracer de la meilleure façon qu'il soit l'image des forêts métallurgiques.

L'approche croisée des travaux historiques avec les études paléoenvironnementales permet aux chercheurs de confronter leurs résultats et ainsi les images des massifs forestiers obtenus. Aucune discipline ne restitue la vérité en terme de végétation forestière mais chacune d'elle permet d'apporter un élément dans l'histoire de ces forêts. La synthèse faite par S. Thiébault dans son ouvrage *« archéologie environnementale de la France »* résume bien la complexité de l'étude des massifs forestiers. *« Comme le rappelle en 1997 Lucie Chabal dans l'introduction de son ouvrage « Forêts et sociétés en Languedoc » : « alors que le botaniste s'intéresse beaucoup à l'histoire de chaque essence, la première question que l'archéologue lui pose concerne la physionomie du paysage, c'est-à-dire l'importance relative de la forêt par rapport aux espaces dénudés. » Malheureusement, il est quasi impossible de répondre. En effet, le taux de boisement ne peut être approché ni par l'anthracologue -qui travaille sur 100 % de ligneux-, ni par le palynologue, ni par le dendrologue.* » (Thiébault, 2010, pp. 62-63).

Etudier les forêts métallurgiques reste donc encore délicat mais on devine à travers les différentes approches de nombreuses pistes pour aller plus loin dans les recherches. L'approche historique peut être envisagée de façon plus globale, laissant de côté les monographies et les anecdotes des maîtres de forge. L'exploitation des données de production, de matières premières etc., doit pouvoir conduire à établir des surfaces de bois exploitées pour les activités métallurgiques.

En ce qui concerne les analyses paléoenvironnementales, chaque discipline continue à évoluer. Bien sûr, l'analyse anthracologique, étudiant directement la végétation arborée, peut aujourd'hui proposer des proportions des différentes essences employées (Badal-Garcia, 1992 ; Chabal, 1997) les études récentes tentent quant à elle d'approcher le diamètre des bois exploités (Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle 2002 ; Dufraisse, 2002; Marguerie et Hunot, 2007). Les méthodologies doivent être affinées et approfondies ; une partie de ce travail de thèse y sera consacrée. Malgré toutes les avancées dans chaque discipline de l'archéobotanique, il faut tout de même prendre conscience, que c'est par la combinaison des indicateurs qu'il est envisageable de redessiner l'histoire des forêts.

Etudes historiques, archéologiques, archéobotaniques et paléoenvironnementales sont donc la clé de l'étude des « forêts métallurgiques », quels que soient la période, le secteur étudié et surtout le type de métallurgie.

Chapitre 2 : Les « forêts métallurgiques » du Périgord Limousin des XVIIIe et XIXe siècles :

entre valorisation et surconsommation des bois : l'intérêt d'étudier les sources écrites

Introduction

En Périgord Limousin, comme dans toutes les régions métallurgiques, la production de fer est largement dominante par rapport aux autres productions métalliques. Utilisé dans quasiment tous les domaines, l'agriculture, l'armement, les objets de la vie quotidienne etc., le fer prend une place importante dans le fonctionnement des sociétés depuis l'Antiquité. Découvert au cours du premier millénaire av. J.C., ce métal devient progressivement incontournable. La demande est de plus en plus forte, atteignant des productions importantes aux Temps Modernes : « *la production métallurgique ne cesse de progresser, stimulée par la puissance accrue des industries et de l'armement. Le développement des usines à fer est perçu comme la cause de la pénurie de bois et de l'augmentation de son prix* » (Arnould, 1978, p. 4). Pour répondre à la demande, les ateliers se multiplient, les technologies évoluent, les hauts fourneaux se généralisent et la consommation en bois augmente indéniablement. Les activités métallurgiques peuvent alors être perçues de deux manières différentes.

Elles peuvent être considérées comme bénéfiques, comme un atout économique pour une région créant de l'emploi en valorisant des ressources naturelles, notamment les

espaces boisés, tout en produisant des biens indispensables à la vie quotidienne (Arnould, 1978 ; Braunstein,1987). D'un autre côté, ces activités industrielles sont souvent considérées comme « dévoreuses des bois », « dévastatrices des forêts », cette vision se répand très largement avec l'utilisation des hauts fourneaux dès les XIV - XVe siècles, lorsqu'il s'agit de produire de la fonte en grande quantité (Belhoste, 1989 ; Woronoff, 1989, 2003).

Le Périgord Limousin n'échappe pas à cette ambigüité pour les Temps Modernes et l'Epoque Contemporaine, entre « forges prédatrices et forges protectrices ». On observe, à travers les témoignages, des impacts sur la forêt différents selon les secteurs, avec des dégâts plus importants au sud qu'au nord. Il est donc intéressant d'étudier de près le rôle joué par les activités sidérurgiques sur les forêts du Périgord Limousin. La sidérurgie est-elle considérée comme un moteur pour la sylviculture, permettant ainsi de valoriser des forêts peu exploitées ? Conduit-elle à la détérioration de certains massifs ? On peut également se demander si cette industrie a engendré des modes de gestion sylvicole particuliers, comme la conduite des forêts en taillis à plus ou moins courte révolution dont on retrouverait alors les vestiges dans les paysages actuels.

Comprendre le lien ambigu entre les activités métallurgiques et les milieux forestiers nécessite une approche quantitative. En comparant les quantités de bois consommées par les forges avec les surfaces de forêts présentes sur les communes proches des établissements sidérurgiques, il est alors envisageable d'évaluer l'importance des prélèvements en bois. Dans le cadre de ce chapitre, une démarche méthodologique est proposée permettant de réaliser ces comparaisons pour étudier de façon la plus objective possible le rôle joué par les hauts fourneaux et les affineries sur l'état des forêts des XVIIIe et XIXe siècles en Périgord Limousin.

Ce travail est centré sur une zone plus réduite du Périgord Limousin (figure 1). En effet, le Limousin comme le Périgord sont des territoires très vastes. Le Limousin, composé de trois départements, la Corrèze, la Creuse et la Haute Vienne, ne présente des activités métallurgiques que sur la bordure sud-ouest compte tenu de la répartition des gisements de minerais localisés sur la bordure du Massif central. En revanche, le Périgord (nord de la Dordogne) présente quant à lui des vestiges d'activités métallurgiques aussi bien au nord qu'au sud. Mais ce territoire, trop vaste et très hétérogène, ne permet pas de conduire une approche méthodologique. C'est pourquoi l'étude porte seulement sur le nord du Périgord

et le sud-ouest du Limousin, territoire métallurgique plus homogène en ce qui concerne les implantations des hauts fourneaux et des affineries. Seules, les forges comprises entre Angoulême, Périgueux et Limoges ont alors été étudiées (figure 1).

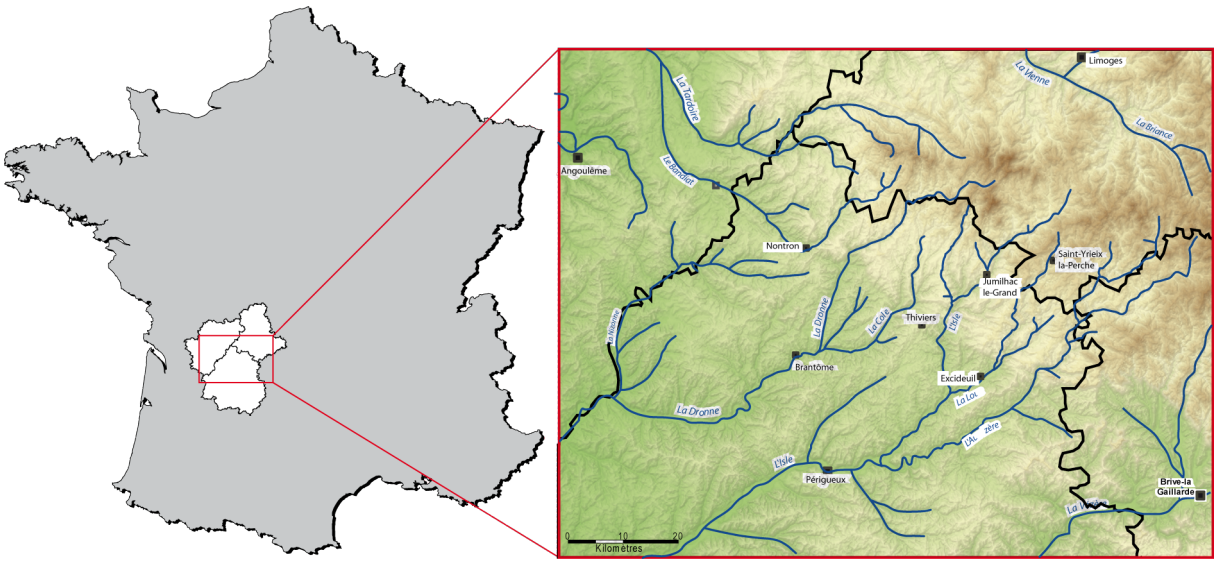


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude, située aux confins du Périgord et du Limousin

1. Les forêts au cœur des activités sidérurgiques

Quelles que soient les méthodes de réduction, directe ou indirecte, dans des bas fourneaux, dans des forges à la catalane, dans des hauts fourneaux, la production de fer nécessite d'importantes quantités de charbon de bois. La demande en métal étant croissante au cours des siècles, malgré les évolutions technologiques permettant d'obtenir de meilleurs rendements, les besoins en bois sont considérables. Le bois reste, jusqu'à l'utilisation du coke à partir des années 1860, un élément incontournable de la chaîne opératoire de la production de fer ; ce sont d'ailleurs les stratégies d'approvisionnement en combustible qui sont, en grande partie, à l'origine des choix dans l'implantation des ateliers de réduction.

1.1. L'approvisionnement en bois, responsable de l'organisation des territoires sidérurgiques

Au cours des siècles, les procédés de réduction du fer ont énormément évolué, passant de simples ateliers implantés en forêt à de véritables complexes industriels érigés le long des cours d'eau ; mais la question de l'approvisionnement en bois a de tout temps été au cœur des stratégies d'implantation des ateliers dans le territoire.

1.1.1. « Les forges volantes » implantées au plus près de la ressource en combustible

Depuis la découverte de la réduction du fer, au cours du premier millénaire av. J.C. jusqu'à l'apparition du procédé de réduction indirecte en hauts fourneaux entre le XIVe et le XVe siècle, la production de fer a été réalisée dans des bas fourneaux (Mohen, 1990 ; Mangin, 2004). Ces fours, généralement en élévation, construits en terre et en pierre permettaient de produire des loupes de fer qu'il fallait épurer (retirer les restes de scories) et compacter par martelage à chaud ou à froid pour permettre ensuite le façonnage d'objets. Les « forges volantes », souvent démolies après une ou plusieurs coulées, sont facilement reconstruites et déplacées selon les avancées des fronts forestiers, s'approchant ainsi au plus près des zones de production de charbon de bois. Différentes études conduites en France mettent en avant cette proximité entre la zone de réduction du minerai et le lieu de transformation

du bois en charbon de bois (Eschenlohr et Serneels 1991 ; Dunikowski et Cabboi, 1995). Le cas de la forêt de la Braconne, située à l'est de la région d'étude, est un exemple de ce mode de fonctionnement pour l'époque médiévale. On retrouve de nombreux ferriers (amas de scories) associés à des plateformes de charbonnage datées de la même période. (Euba-Rementeria et Rouaud 2010 ; Queuille, 2011, 2012 ; Rassat, 2010, 2011, 2012).

L'itinérance de ces ateliers peut s'expliquer par les quantités importantes de charbon de bois nécessaires à la production de quelques kilogrammes de fer. Définir le volume de charbon de bois nécessaire au fonctionnement des bas fourneaux est encore délicat; malgré de nombreuses recherches expérimentales ou ethnologiques, les proportions proposées varient énormément d'un site à l'autre. Le chapitre rédigé par N Dieudonné Glad dans l'ouvrage « travail de la terre, travail du fer » résume bien la complexité de cette approche (Dumasy et al., 2010). « *Son estimation [la quantité de bois] peut être tentée grâce aux rapports « masse de minerai / masse de charbons de bois » établis lors d'expérimentations ou d'observations ethnologiques. Ces données sont aussi abondantes et variées que les expérimentations menées ces quarante dernières années. A Lercoul (Dubois, 2000, p. 61) 34,5 kg de charbon de bois permettent de réduire 30 kg de minerai (rapport 1,15), tandis que R. Tylecote emploie une proportion « charbon / minerai » variant de 0,25 à 2 suivant les opérations (Tylecote et al., 1971, p. 354). P. Crew, dans ses travaux, utilise un rapport variant de 1 à 2 (Crew et Salter, 1991). P-L. Pelet estime cependant qu'un fourneau de réduction consomme « en poids quatre fois plus de charbon que de minerais (Pelet, 1993, p. 99)* » (Dieudonné-Glad, 2010, p. 346).

La grande variété de ratios proposés explique les différences d'interprétation de l'impact des bas fourneaux sur le couvert forestier. Certains auteurs considèrent que les prélèvements en bois étaient relativement faibles, c'est le cas pour le site de Lalté à Oulches dans l'Indre (Dieudonné-Glad, 2010) ou encore pour celui des Clerimois dans l'Yonne (Dunikowski et Cabboi, 1995). D'autres voient au contraire les bas fourneaux comme d'importants consommateurs de bois conduisant même au déboisement de certains espaces ; « *les environs immédiats des Martyrs ont dû être rapidement déboisés, et il est vraisemblable que pour éviter la pénurie de combustible, les sidérurgistes ont dû gérer la forêt à leur usage [...]* » (Domergue, 2004, p. 205).

1.1.2. L'utilisation de l'énergie hydraulique à l'origine des changements dans les modes d'approvisionnement en combustible

Au cours des siècles, les procédés techniques ont largement évolué, transformant les ateliers temporaires en véritables complexes industriels. L'emploi de l'énergie hydraulique est une grande innovation technologique pour faciliter le traitement des loupes de métal. F. Dabosi retrace cette évolution « L'antique forge volante, désignée comme forge à bras [car les soufflets étaient actionnés à la force des bras], liée à la disponibilité en bois est souveraine autour de l'an mil. Probablement dès le début du XIIe siècle, la « mouline de fer » s'y substitue, implantée au bord des torrents ariégeois ou catalans ; marteaux et martinets sont désormais actionnés par l'eau [...]. » (Dabosi, 2004, p. 75).

Mais la délocalisation des ateliers hors des forêts pour s'implanter le long des cours d'eau a profondément changé l'organisation du territoire et notamment les modes d'approvisionnement en combustible. Il s'agit, dès lors, d'acheminer la matière première jusqu'aux fours ; cela implique des coûts de transport qui sont d'autant plus élevés que la distance est importante. De plus, le charbon est un produit fragile, supportant mal le transport en charrette. Plus la distance à parcourir s'allonge plus la qualité de ce dernier est médiocre pour la réduction dans les fours. Afin de limiter ces distances, la zone d'implantation des usines doit être bien choisie. Les moulines de fer se transforment progressivement en forges à la catalane (Verna, 2001), forges pour lesquelles l'énergie hydraulique est également employée pour actionner des soufflerie permettant ainsi d'obtenir des températures de fusion plus élevées. Leur apogée, au XVIIe siècle, conduit à exploiter de façon intensive les forêts, c'est notamment le cas sur les versants Pyrénéens (Bonhôte, 1998 ; Cantelaube, 2005 ; Izard, 1999 ; Davasse, 2000). Les études faites sur plusieurs vallées montrent les changements des modes de gestion des massifs forestiers pour répondre aux demandes accrues en charbon de bois des établissements sidérurgiques. L'étude des textes a permis de retracer l'histoire forestière de ces versants, passant de belles futaies de hêtraie sapinière à des taillis monospécifiques à courte révolution (Bonhôte, 1998 ; Davasse, 2000). Dès le XIIIe siècle, les documents écrits concernant la gestion des espaces forestiers et les activités métallurgiques se multiplient : plaintes, conflits d'usages mais également ordonnances pour règlementer la gestion des forêts et établissements sidérurgiques. Certains auteurs attribuent à ce changement technologique la nécessité d'instaurer une réglementation de l'exploitation

des forêts mais également la mise en place d'une gestion des espaces forestiers (Bonhôte et Fruhauf 1990 ; Izard, 1999 ; Verna, 2001). Ces observations doivent tout de même être nuancées. En effet, ce n'est qu'au début du XIIIe siècle que les plaintes, les conflits et les ordonnances sont particulièrement bien retranscrites du fait d'une généralisation de l'écrit ; cela coïncide parfaitement avec ces innovations technologiques, mais cela ne signifie par pour autant que les conflits ne commence qu'à partir de cette période. De plus, d'après les travaux d'archéométallurgistes, la mise en place de forêts gérées pour l'approvisionnement en combustible des activités métallurgiques s'imposait bien avant l'utilisation de l'énergie hydraulique « *Les sidérurgistes de [l'Antiquité] ont su gérer la forêt à leur usage comme l'ont fait au XIXe et XXe siècles les compagnies minières* »(Domergue, 2004, p. 205).

Enfin la question du choix de l'implantation de complexes sidérurgiques en fonction des ressources naturelles présentes sur un territoire est encore plus marquée pour le stade ultime de l'évolution technologique des fours de réduction du minerai : les hauts fourneaux. Ces derniers, apparus en France au XIV-XVe siècle, demandent des quantités de charbon de bois d'autant plus importantes que les quantités de fonte produites sont décuplées. En effet, en une seule coulée, la quantité de métal produite est bien plus importante, mais il ne s'agit plus de loupe de fer, mais de gueuse de fonte, fer très riche en carbone et plus cassant ; l'affinage par martelage à chaud dans un second bâtiment est donc réalisé dans les affineries.

L'énergie hydraulique joue un rôle important dans ces usines puisqu'elle est utilisée à la fois pour actionner les soufflets des hauts fourneaux et des foyers d'affinerie ; pour mouvoir les marteaux et les martinets des affineries ou encore pour broyer le minerai avec les bocards. La construction de tels bâtiments engendre un investissement important de la part du propriétaire qui, pour amortir ses frais, doit évaluer la rentabilité de sa forge. L'approvisionnement en bois est alors le facteur déterminant. Le propriétaire, avant toute construction, doit s'assurer que les ressources en bois sont suffisantes sur une aire d'approvisionnement relativement proche de la forge. On voit alors des forêts situées à proximité des forges destinées entièrement à la production de charbon de bois pour les « fonderies » : « *Un périmètre de près de 30 km carrés de forêts peuplées de vieux arbres, que le duc de Lorraine voue au service exclusif de la nouvelle fonderie* » (Garnier, 2004, p. 375).

De nombreux historiens, géographes et sociologues se sont penchés sur la question de la sidérurgie en hauts fourneaux, et tous évoquent une gestion sylvicole pour les besoins de la métallurgie. Voici un exemple d'une forêt de Mayenne pour la fin du XVIe siècle : « La forêt était désormais mise en coupes réglées de quelques 150 arpents par an de taillis âgés de 24 ans. » (Belhoste, 1990, p. 229).

La mise en place de mode de gestion pour approvisionner les hauts fourneaux en combustible peut, selon les secteurs mais également en fonction des périodes, être perçue comme bénéfique pour la région, permettant de mieux gérer des espaces forestiers délaissés. A l'inverse, ces réglementations, ces aménagements sont parfois perçus comme contraignants pour d'autres utilisateurs, et même conduire à des plaintes et des conflits d'usage.

1.2. « Forges prédatrices, forges protectrices », le rôle ambigu des activités sidérurgiques sur les espaces forestiers

Plusieurs chercheurs ont abordé ce sujet « forges prédatrices, forges protectrices ». D. Woronoff est le premier à mettre en avant le rôle ambigu de ces activités sur les espaces forestiers entre manière de conserver, protéger les forêts et au contraire des phénomènes de surexploitation conduisant à l'épuisement des sols et à la destruction de certaines forêts (Woronoff, 1984).
Husson reprend particulièrement bien ce paradoxe : « Les usines à feu ont-elles exercé un rôle bénéfique ou ont-elles accéléré les dégradations ? Les réponses à cette interrogation sont multiples et varient à la fois dans le temps et l'espace et en fonction du statut des entreprises concernées. Ce constat, en apparence, placé sous le signe de la contradiction, doit être nuancé ; l'image dominante laissée par les cahiers de doléances assimilant les bouches à feu à des gouffres dévorants n'étant pas toujours justifiée. Les usines à feu ont imposé la création d'une forêt nouvelle, privative, accordant la priorité aux choix de gestion. Elles ont permis la pérennité de vastes massifs bien abornés. Elles furent souvent implantées dans des régions peu peuplées et étaient alors le meilleur moyen de valoriser du matériel ligneux jusque-là inexploité. » (Husson, 1995, p. 133).

Cette opposition entre « forges prédatrices » et « forges protectrices » est d'autant plus prégnante pour les Temps Modernes et l'Epoque Contemporaine avec la multiplication

des hauts fourneaux et des affineries afin de répondre aux commandes de canons pour l'armement mais également pour fournir en outils les activités agricoles ou encore les foyers domestiques. Il est difficile, à partir des documents écrits, de faire la part des choses entre valorisation ou surexploitation des espaces forestiers. Quels crédits accorder aux plaintes retrouvées dans les cahiers de doléances ? Chaque utilisateur, défendant ses propres intérêts, va accentuer ou au contraire atténuer l'impact des activités métallurgiques sur la forêt.

D. Woronoff, dans son article « la politique des autorisations d'usines et la question du bois », montre bien à travers les différentes ordonnances que les autorités sont partagées entre devoir de protection des forêts et enjeux économiques. « François Ier avait songé à réduire le nombre de forges, il le rappelle le 18 mai 1543, en décidant de surseoir à cette décision : « *Comme en regardant le grand dégât et dépopulation qui se faisait ès bois et forêts de notre royaume, pour fournir et entretenir le grand nombre de forges à fer situées près les dites forêts, nous, pour à ce obvier, eussions par ci-devant avisé de faire réduire les dites forges à nombre certain et suffisant pour fournir de fer notre royaume seulement…* ». *S'il a renoncé à cette mesure radicale c'est par souci, expose-t-il de ne pas défavoriser la production si utile à l'économie du pays.* » (Woronoff, 1990, p. 58).

Le XVIe siècle semble être une période charnière dans la prise de conscience de l'importance de protéger les forêts mais également de continuer la production de fer. On voit dès lors apparaître le principe de « l'autorisation », de la « permission ». Chaque maître de forge doit demander une autorisation aux autorités avant la construction ou la remise en fonctionnement d'un établissement sidérurgique. Mais les ordonnances aux contenus flous n'étaient que peu respectées, et jusqu'en 1810 les complexes sidérurgiques fleurissaient sur les bords des cours d'eau sans aucune autorisation. Ce n'est qu'en avril 1810 que la législation minière a été modifiée, proposant un texte de loi plus strict « *les fourneaux, les forges et martinets … ne pourront être établis que sur une permission accordée par un règlement d'administration public* » (extrait de la loi, cité par Woronoff, 1990, p. 61). Cette nouvelle loi permet ainsi de réguler le nombre de forges, mais surtout de vérifier que chaque établissement construit puisse subvenir à ses besoins en combustible sans nuire à l'approvisionnement en bois des autres activités industrielles et domestiques. Chaque dossier est dès lors examiné, des enquêtes sont conduites auprès des organismes des Eaux et Forêts afin de vérifier la disponibilité des bois pour alimenter des hauts fourneaux. Si les ressources

en bois sont considérées trop faibles, alors la construction de la forge doit être interdite. Mais finalement cette loi intervient tardivement dans l'histoire des constructions des hauts fourneaux puisque presque toutes les forges ont été construites avant sa promulgation, conduisant à la surexploitation des forêts dans certains secteurs, comme en Normandie ou encore en Lorraine (Andrieux 1987 ; Andrieux et al., 1988 ; Arnoux, 1990).

Le Périgord Limousin ne fait pas exception à cette règle ; de nombreuses forges sont construites dès le XVIe siècle et selon les secteurs, les conséquences de ces implantations sont différentes. Ces quelques citations en témoignent.

Certains observateurs présentent les forges comme un excellent moyen de valorisation économique pour la région :

« *Le fer est très abondant dans la subdélégation de Thiviers et les forges qui y sont établies sont d'un très grand avantage pour le pays, elles aident beaucoup à la consommation du bois, qui est aussi abondant et dont on ne tirerait presque aucun parti à cause de la difficulté du transport* » (Subdélégué de Thiviers, 1788, cité dans Peyronnet, 1958) ;

« *Il n'y a pas à craindre de disette de bois* » (Subdélégué de Chalus, 1788, cité dans Peyronnet, 1958).

D'autres au contraire rendent la sidérurgie responsable des dégâts commis dans les forêts :

« *Elles [les forges] sont toutes alimentées par du bois, ce qui l'a rendu fort rare dans le pays et a triplé sa valeur depuis 35 à 40 ans* »(Subdélégué de La Rochefoucauld, 1788, cité dans Peyronnet, 1958).

Ces témoignages proviennent de trois contextes géographiques et économiques différents, ce qui permet d'obtenir trois visions très différentes de l'exploitation des forêts en Périgord Limousin. La pression des activités sidérurgiques sur les espaces boisés dépend bien sûr du nombre d'usines implantées sur un même territoire, des quantités de métal produites, des rendements, des durées de fonctionnement etc. Le nord de la Dordogne et la Charente comptent de nombreuses usines ; en revanche, le sud du Limousin en présente un nombre beaucoup plus faible. Ce fait explique en partie les différences de point de vue sur la gestion des espaces forestiers. Il faut donc étudier avec attention l'emprise des activités sidérurgiques sur les espaces forestiers en comparant les surfaces forestières exploitées aux surfaces existantes sur le territoire.

2. Evaluer les besoins en bois pour les forges du XVIIIe au XIXe siècle en Périgord Limousin

Le Périgord Limousin, souvent considéré comme territoire rural, dominé par des espaces forestiers, par l'agriculture et l'élevage, présente en réalité un passé industriel. « *Le Périgord n'a jamais semblé capable d'entraîner dans son sillage une image industrielle forte. Pourtant son substrat proto-industriel a, dès la fin du XVe siècle, mis peu à peu en valeur l'important potentiel hydraulique et forestier de son territoire et s'est mécanisé dans les limites autorisées par ce choix. Et, comme l'attestent par exemple les comptes de plusieurs châtellenies ou les sources notariales, c'est au contact des massifs forestiers les plus anciens que de nouveaux minerais de fer, inutilisés jusqu'alors en raison de leur composition phosphoreuse ou siliceuse, commençaient à être exploités corrélativement à la diffusion du procédé de fonte en haut fourneau capable de traiter de grandes quantités* » (Lamy, 1987, p. 11-12). Trois siècles durant lesquels le nombre d'usines n'a cessé d'augmenter. Face à la multiplication de ces usines, comment la ressource en bois a-t-elle été gérée ? Pour évaluer l'emprise de ces usines sur le couvert forestier il est primordial dans un premier temps de connaître l'importance de ces activités. Il s'agit donc de retrouver le nombre d'usines en fonctionnement et d'évaluer les quantités de fonte et de fer produites pour chacune d'elles et cela pour différentes périodes.

2.1. Répertorier les établissements sidérurgiques, première étape pour évaluer l'importance de la métallurgie du fer en Périgord Limousin

Avant de rechercher de façon précise les productions pour chaque forge, il était important de construire un véritable Système d'Information Géographique permettant de localiser précisément chaque forge. Ce travail a déjà été réalisé dans le cadre d'études universitaires (Pijassou, 1954 ; Peyronnet, 1958 ; Bouchillou, 1986 ; Lamy, 1984, 1987), sur des recherches menées au titre de l'Inventaire Général initié dans les années 1980 (Lamy, 1992), sur les prospections réalisées au sein de différentes associations (la Route des Tonneaux et des canons, Feu Fer Forge Minéraux Minerais Métaux).
Il ne s'agissait donc pas de refaire ces recherches mais plutôt de réaliser une cartographie

au format numérique plus facilement exploitable que les différentes cartes papier réalisées précédemment.

2.1.1. Le travail d'inventaire des établissements sidérurgiques

La localisation des établissements sidérurgiques en Périgord Limousin a été initiée dans les années 1950 avec les travaux de E. Peyronnet (Peyronnet, 1958). Il est le premier à proposer une cartographie des établissements sidérurgiques en dissociant les usines produisant à la fois de la fonte et du fer de celles qui ne procèdent qu'à la phase d'affinage pour produire du fer.

C'est sous l'impulsion d'un inventaire général du patrimoine industriel que ces recherches ont été approfondies dans les années 1980. Il est vrai que pendant longtemps les historiens et les archéologues ont délaissé les vestiges des activités industrielles quelles que soient les régions françaises. Des chercheurs s'associent dans les années 1980 pour inventorier l'ensemble de ces bâtiments industriels, qu'il s'agisse de papeteries, de tuileries, de tanneries, de fours de métallurgies, etc. (Benoit, 1986 ; Braunstein, 1986 ; Peyre, 1986 ; Lamy, 1987, 1992). Les établissements sidérurgiques faisaient partie des axes importants de ces inventaires : « *Le programme pluriannuel de recherche de l'Inventaire général propose donc de recenser et d'étudier sélectivement les sites de cette métallurgie indirecte au bois. [...] Un certain nombre d'opérations achevées ou en cours permettent de couvrir une grande partie de l'Ouest, de la Normandie aux Pays de Loire, du Sud Ouest du Périgord aux Pyrénées, les Ardennes, la Lorraine, la Bourgogne, le Dauphiné et la Savoie. Des opérations en Berry et en Champagne vont venir s'y adjoindre* » (Belhoste, 1986, p. 36).
Une grande partie des hauts fourneaux mais aussi des bâtiments d'affinerie a ainsi été répertoriée à partir d'observations faites sur le terrain ou bien par le dépouillement d'archives et l'étude de cartes anciennes.

Le travail réalisé par Y. et M.L. Lamy dans le cadre de cet Inventaire Général permet aujourd'hui de bien connaître la localisation des différentes forges pour les vallées de l'Isle, de l'Auvézère et de la Dronne (Lamy, 1992).
Parallèlement à ces recherches, les travaux d'étudiants coordonnés par Bouchillou ont permis de localiser plus précisément l'ensemble des forges de la vallée de l'Isle. Pour chaque

établissement les coordonnées géographiques sont mentionnées ainsi que de nombreuses informations concernant l'historique des établissements, les successions de propriétaires, les quantités de métal produites ainsi que leurs débouchés (Bouchillou, 1986).

Ces inventaires se poursuivent dans le cadre de recherches conduites par des associations comme « la Route des Canons en Dordogne » créée en 1996 et « la Route des Tonneaux et des Canons (RTC) », en Charente, créée en 2002. Aujourd'hui chaque forge bien identifiée fait l'objet d'un relevé des coordonnées géographiques à l'aide d'un GPS. Ces associations sensibles à la conservation du patrimoine de leur région permettent d'initier des projets de conservation et de sauvegarde de ces bâtiments. La forge de Savignac Ledrier (en Dordogne sur la rivière Auvézère) a fait l'objet d'un important travail de restauration pour rendre ce site accessible au public. C'est également le cas de Forge Neuve à Javerlhac : ce double haut fourneau fait maintenant office de musée. On connait également d'autres cas où les bâtiments ont été restaurés et destinés à un tout autre usage, comme la forge de Combiers, convertie aujourd'hui en discothèque. Toutes les forges ne sont pas visibles ; parfois on ne retrouve plus que des murs (figure 2) ; il arrive également qu'aucune trace de bâtiments ne puisse être distinguée dans le paysage, seuls les tas de scories témoignent d'un passé de réduction du minerai de fer. Lorsque les activités cessèrent, les bâtiments les plus isolés n'ayant pas fait l'objet de reconversion, ont été progressivement démantelés, servant de carrière de pierres aux habitants des villages voisins.

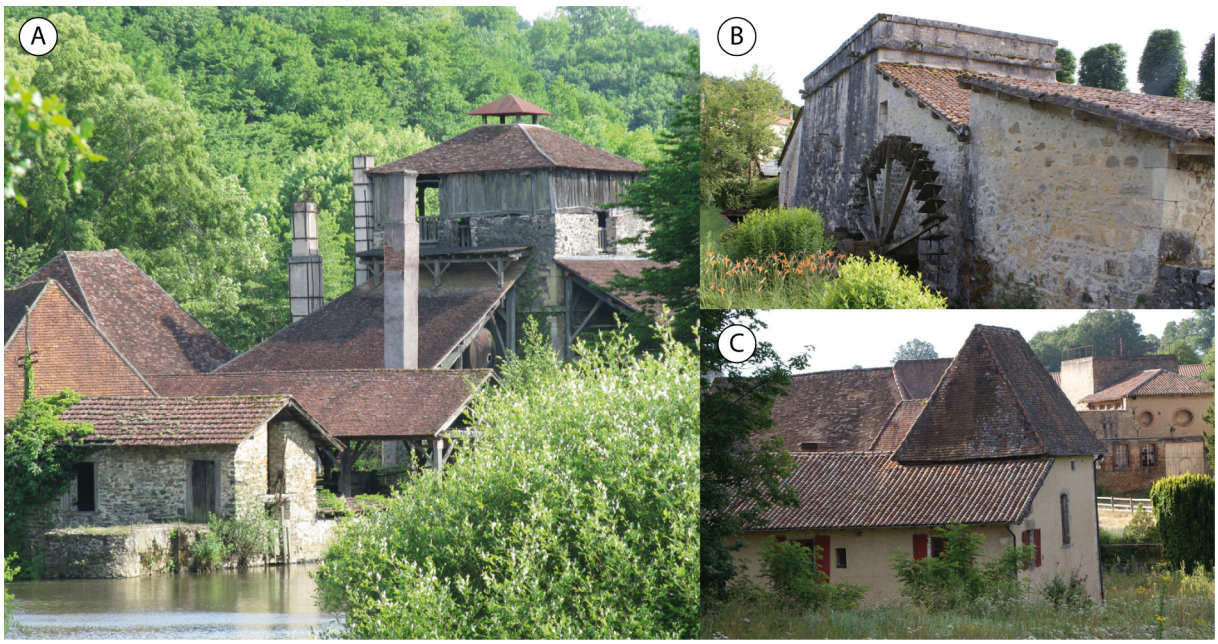


Figure 2 : A) Forge de Savignac Lédrier, B) Forge Neuve, C) Forge de la Rivière. (Clichés S. Paradis-Grenouillet)

2.1.2. Des « cartes papier » au Système d'Information Géographique

L'inventaire réalisé dans le cadre de l'Inventaire national avait conduit à la production de cartes réalisées à la main. A l'échelle du Périgord Limousin la localisation des forges était très imprécise, sur certains documents l'ordre des forges parfois même inversé d'amont en aval sur le cours d'eau. Afin de spatialiser les productions de fer et de fonte, les quantités de bois nécessaires et pour comparer ces données aux surfaces de bois existantes, il est important d'informatiser l'ensemble des données en créant un véritable Système d'Information Géographique (SIG).

Les forges uniquement repérées sur les « cartes papier » réalisées par E. Peyronnet (1958), A. Nogue (1959) ou encore Y. Lamy (1984, 1987) ont fait l'objet d'une recherche plus approfondie pour obtenir la localisation la plus précise possible.
A partir des fonds de carte IGN au 1/25 000 chaque forge a été géoréférencée selon deux modalités de localisation :

- « une localisation précise » lorsque sur les fonds de carte IGN et photographies aériennes on retrouve les traces de bâtiments industriels, des aménagements des cours d'eau ou un toponyme portant le nom de la forge.
- dans les cas où aucun indice cartographique n'indique la présence d'une ancienne forge, la forge a alors été placée sur la commune, sur le cours d'eau mentionné par les archives à l'emplacement qui semblait le plus judicieux (aménagement de retenue d'eau par exemple). Bien que le choix de l'emplacement ne soit pas certain, il était important de représenter ces forges sur la carte.

A l'issue de cette première localisation, certaines localisations ont été confirmées par la suite lors de prospections pédestres réalisées dans le cadre des groupes de recherche de la Route des Tonneaux et des Canons.

Pour chaque établissement recensé, la fonction a été recherchée. S'agissait-il de forge produisant de la fonte et réalisant l'affinage, ou procédait-elle simplement à la phase d'affinage ? Les deux types d'activités ont ainsi pu être différenciés sur la carte (figure 3).

Localisation des hauts fourneaux et des affineries*

Tardoire - Trieux - Colle

1. Rancogne. 2. Pierre Pensue*. 3. Le Fayard*. 4. montizon. 5. La Plaine*. 6. La Valade*. 7. La Bicoque*. 8. Forge Neuve*. 9. Pontrouchaud. 10. Raux*. 11. Le Buisson*. 12. Peyrassoulat*. 13. La Couade*. 14. La Forge. 15. Les Séchères*. 16. La Rivière. 17. Les Mondoux*. 18. Chez Bigot*. 19. Lamendeau*. 20. Chez Gaborier*. 21. Busserolle. 22. Champniers*. 23. La Salamonie*.

Bandiat

24. De Guillot. 25. La Mothe. 26. La chapelle Saint Robert. 27. Forge Neuve. 28. Jomelière. 29. Etouars. 30. Saint Estèphe*. 31. Moulin blanc*. 32 Lamendeau*. 33. Les salles*. 34. Chez Lemaire*. 35. Brouillaud*. 36. Laveneau*. 37. Forge Basse. 38. Chez Baillot*. 39. Manzac*. 40. Ballerand. 41. Lascaux*. 42. Lespinassie*. 43. Forge de Jacques*. 44. Bouturias*. 45. Forge Basse*. 46. Puydonneau*. 47. La chapelle Montbrandeix

Charente

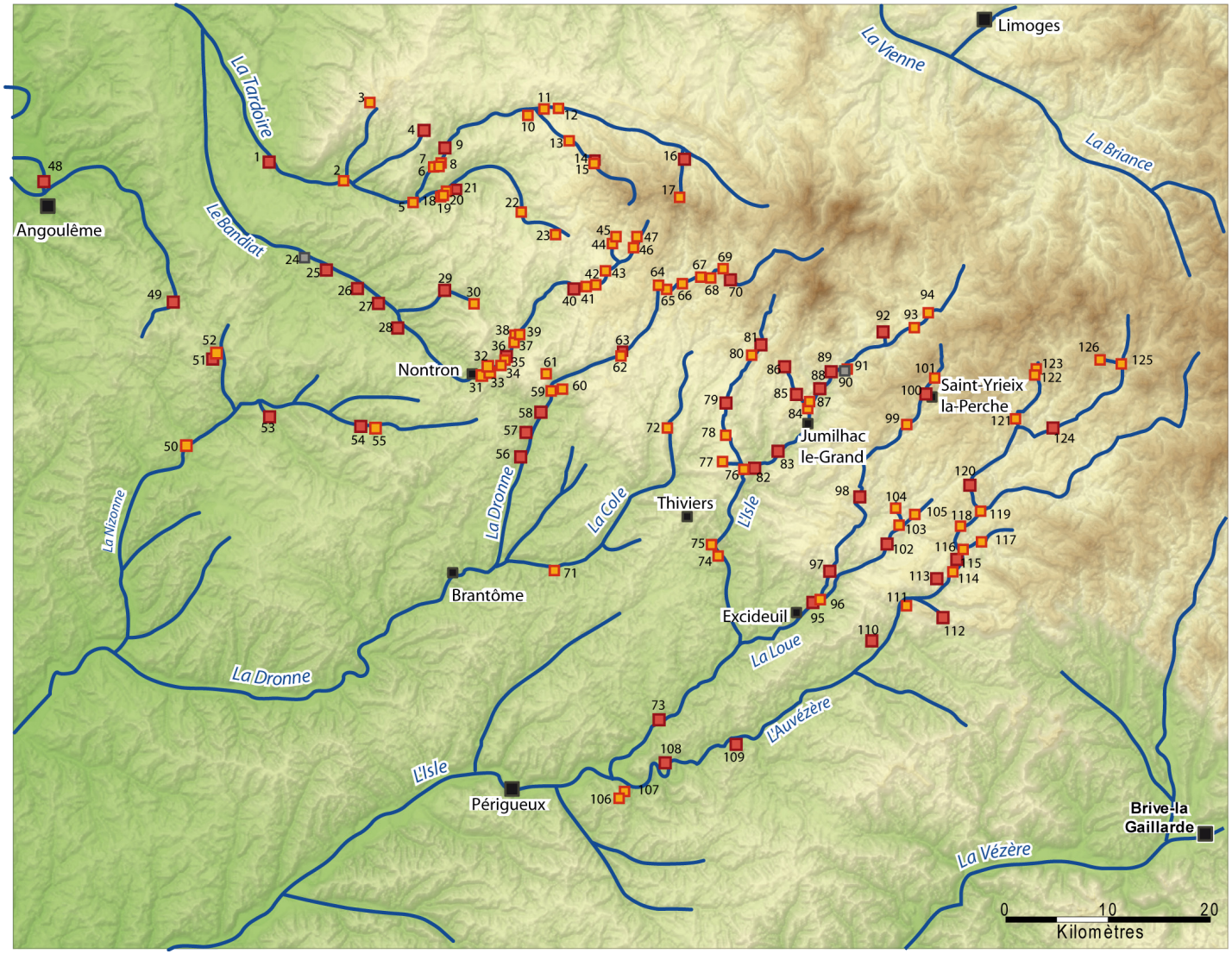
48. Ruelle. 49. Planchemenier

Dronne-Nizonne-Cole

50. Lachaussade*. 51. Rougnac. 52. Du repaire*. 53. Combiers. 54. Bonreceuil. 55. Rudeau*. 56. Le caneau. 57. Cancaux. 58. La Rebière. 59. La Malancourie*. 60. Ladorie*. 61. La Valade*. 62. Chapelat*. 63. La Maque. 64. Lambertie*. 65. Dournezac*. 66. Madebaud*. 67. Altavaux*. 68. Thavaux*. 69. Dournazac*. 70. Firbeix. 71. Rochecaille*. 72. La Rue*.

Isle-Loue-Auvézère

73. Saint VIncient sur l'Isle. 74. La Roche*. 75. Linard*. 76. Graffanaud*. 77. La Valade*. 78. Gourbareau*. 79. Mavaleix. 80. La Meynardie*. 81. La Barde. 82. Fayolle. 83. Montardy. 84. La Faye*. 85. Les Feynière. 86. Le Moulinf neuf. 87. Bas Cros. 88. Le Gravier. 89. Viallette forge basse. 90. indice de sidérurgie (tiendeix). 91. Tindeix. 92. Besson. 93. Leyssart*. 94. Les beiges*. 95. La farge. 96. Les Fourches*. 97. Gandumas. 98? Beausoleil. 99. Deszieu*. 100. Baudy. 101. Etang dernier. 102. Miremont. 103. Etang neuf.* 104. La pialle.* 105. Coulon*. 106. Le Chabier*. 107. La Roquette*. 108. Auberoche. 109. Ans. 110. Anlhiac. 111. Pervendoux*. 112. Bord. 113. Savignac Lédrier. 114. Moulin du Got*. 115. Malherbaux. 116. Vaux*. 117. Pissac*. 118. Payzac. 119. Le Peyrat*. 120. La Faye. 121. Bologne*. 122. Marsaguet*. 123. La Serrerie*. 124. Chauffaille. 125. Forge Neuve*. 126. Chabrenas



Haut fourneau Affineries

Figure 3 : Carte de localisation des établissements sidérurgiques

2.2. Retrouver la production des établissements sidérurgiques

De nombreux documents écrits (livres de roulement rédigés par les maîtres de forge, enquêtes générales ordonnées par les autorités, actes de vente de produits finis ou d'achat de matière première enregistrés dans les archives notariales etc.) permettent de retrouver les productions de fonte et de fer produites dans les différentes forges. C'est à partir de ces données quantitatives qu'il est alors envisageable d'évaluer les quantités de charbon de bois employées et donc de remonter aux surfaces de forêts exploitées pour ces usages. Différentes recherches ont déjà été réalisées sur la question de la production de fer en Périgord Limousin, et nous nous somme donc appuyés sur ces travaux. Ces synthèses permettent une acquisition plus rapide des données de production, en revanche il faut bien prendre en considération qu'il s'agit d'informations déjà traitées, parfois converties dans des systèmes de mesures différents des données d'origine, cela peut donc introduire des biais. Après avoir présenté les documents sur lesquels nous nous sommes appuyés, nous développerons les avantages et les inconvénients de recourir à ces travaux.

2.2.1. Résultats d'enquêtes et documents de synthèse, un moyen d'acquérir une grande quantité d'informations

Pour obtenir des données de production d'un grand nombre d'établissements sidérurgiques, il a été choisi dans le cadre de ce travail d'utiliser quelques résultats d'enquêtes mais surtout des documents de synthèse réalisés par différents chercheurs. Les livres de roulement et les actes notariés sont certes des documents particulièrement riches pour étudier dans le détail l'évolution de la production de chaque établissement sidérurgique au cours des Temps Modernes et de l'Epoque Contemporaine, mais ces derniers sont souvent fragmentaires, difficiles d'accès et nécessitent un travail considérable pour collecter quelques informations.

Dans le cadre de cette étude, il ne s'agissait pas de dépouiller les nombreuses liasses d'archives portant sur chacune des forges mais plutôt de tester une démarche méthodologique à partir de données déjà acquises et déjà publiées par différents auteurs. En effet, des historiens, des géographes ou encore des sociologues ont déjà étudié ces documents d'archives et ont produit des ouvrages compilant l'ensemble des données retrouvées (Pijassou, 1954;

Peyronnet, 1958; Gille, 1960; Nogues, 1980; Lamy, 1984; Bouchillou, 1986; Lamy, 1987).

Le travail de Gille « les forges françaises en 1772 » contient l'ensemble des productions de fonte et de fer des forges françaises pour l'année 1772 (Gille, 1960). Classées par généralité, chaque forge est mentionnée, indiquant le nom du propriétaire et de l'exploitant. Dans cet ouvrage le Périgord Limousin n'est pas totalement renseigné, on retrouve uniquement les données de la généralité de Bordeaux. Il semblerait que lors de cette enquête la généralité de Limoges n'ait pas fait remonter ses résultats mais uniquement une lettre de Turgot, « *les résultats de l'enquête sur les forges [de la généralité de Limoges] ne figurent pas dans les archives de l'Intendance de Limoges. Par contre, la lettre de Turgot [datant du 24 décembre 1773] qui accompagnait l'état qui fut dressé, a été conservée* » (Gille, 1960, p. 125). Celle-ci décrit brièvement l'état des activités métallurgiques du Limousin. Grâce à ce document près de 50 forges ont pu être renseignées pour l'année 1772.

Les forges de la Haute Vienne, non renseignées pour l'année 1772, sont en revanche particulièrement bien décrites pour l'année 1808. Pour cette année la Haute Vienne a fait l'objet d'une enquête statistique très exhaustive. Celle-ci publiée sous le nom du préfet Texier Olivier a en fait été réalisée par Elie Lefévre et Rougier Chatenet. Cette première enquête socioéconomique de la Haute Vienne a été éditée la même année, puis rééditée récemment en 1992. On y retrouve les productions de fonte et de fer, leurs prix de vente ainsi que leurs débouchés. Dans les descriptifs du fonctionnement des différentes forges, quelques données portant sur les quantités de charbon de bois employées sont particulièrement intéressantes pour notre étude. Même si le nombre de forges renseignées reste faible (moins de dix forges), les données acquises sont de qualité et n'ont pas fait l'objet de retranscription ni même de conversion pouvant conduire à déformer l'information.

Afin d'obtenir un plus grand nombre d'informations sur l'ensemble des forges du Périgord Limousin et cela pour différentes dates, des documents de synthèses, sortes de catalogues regroupant de grandes quantités de données de production ont également été utilisés. Ces travaux sont issus de longues années de recherches aux archives pour en extraire l'information (Pijassou, 1954 ; Peyronnet, 1958 ; Bouchillou, 1986). S'il est très facile de retrouver dans ces travaux les données de production ou encore de consommation pour chaque forge et pour différentes années, il faut néanmoins regretter le traitement des

données effectué par les auteurs. Les données de production retranscrites sont généralement converties dans un système de mesure homogène pour en simplifier la lecture.

C'est le cas du travail réalisé par E. Peyronnet : « Les anciennes forges de la région du Périgord » (Peyronnet, 1958). Ce dernier a mené une recherche très approfondie sur l'ensemble des forges du Périgord, s'appuyant principalement sur les enquêtes ordonnées à l'échelle nationale de 1772, 1789 et 1811. Dans son ouvrage les productions de métal, les quantités de matières premières employées ainsi que les prix de vente et d'achat sont bien détaillés sur de nombreuses forges. Ce travail représente une sorte de catalogue des productions des forges à différentes dates, ce qui simplifie grandement l'acquisition de l'information. Cependant, ce document doit être traité avec précaution car les sources sont rarement mentionnées ; il nous est donc impossible de connaître l'origine des données.

A. Nogues en a simplifié la lecture en classant les données par forge, puis par année (Nogues, 1980). Malgré une utilisation beaucoup plus simple, ce document ne peut se suffire à lui seul. Nous avons constaté que l'auteur a effectué des choix dans ses retranscriptions, en omettant souvent de mentionner les quantités de matières premières achetées et négligeant souvent le combustible.
Le travail réalisé par E. Peyronnet est le seul à aborder la question de la métallurgie à l'échelle du Périgord-Limousin-Angoumois. Les autres travaux sont centrés sur un plus petit territoire, un bassin versant ou encore une forge en particulier.

Par exemple les recherches de Pijassou « L'ancienne industrie du fer en Nontronnais du XVIIe à la fin du XIXe siècle » sont centrées sur les forges de la vallée du Bandiat (Pijassou, 1954). Ce document intègre non seulement des données provenant d'archives nationales, comme les enquêtes utilisées par les auteurs précédents, mais également des documents provenant des archives départementales, communales ainsi que quelques documents issus de fonds privés. Dans les descriptions réalisées pour chaque forge, se dissimulent les données de production de fonte et de fer ainsi que bon nombre de renseignements sur les types d'objets réalisés (canons, boulets, chaudières etc.). Bien que moins facile à exploiter pour obtenir des données quantitatives, ce document est particulièrement intéressant pour comprendre les enjeux de la vallée du Bandiat où les établissements sidérurgiques sont parmi les plus grands fournisseurs de canons de la Marine Royale de Rochefort.

Le travail de Bouchillou « Les forges de l'Isle » est un autre exemple ; il permet quant à lui d'apporter de nombreux éléments sur les forges de l'Isle (Bouchillou, 1986). Ce document riche en données sur la consommation en matière première et sur les quantités de fonte et de fer produites est d'autant plus intéressant puisqu'il mentionne la source de chaque information. A la fin de l'ouvrage l'auteur propose une synthèse, mais force est de constater que sans une approche spatiale il est difficile de retranscrire l'impact des activités métallurgiques sur l'environnement.

Les deux ouvrages les plus récents sur lesquels nous nous sommes appuyés pour acquérir sans difficulté des données quantitatives de production de fonte et de fer et d'utilisation de matière première ont été conduits par Y. et M.L. Lamy. Ces travaux réalisés dans les années 1980-1990 s'insèrent dans la dynamique initiée par l'Inventaire Général du patrimoine industriel.

Le plus ancien, la thèse de Y. Lamy s'intitule « Travail du fer, Propriétés foncières, sociétés paysannes en Périgord » (Lamy, 1984). Ce dernier présente dans un premier temps une synthèse de l'histoire de la sidérurgie en Périgord Limousin, de son fonctionnement en général. Puis, l'auteur s'intéresse particulièrement à la forge de Savignac Lédrier (située sur l'Auvézère, en Dordogne). L'analyse sur cette forge est très poussée pour l'étude des technologies employées mais traite également des propriétés du maître de forges et notamment des espaces forestiers. L'auteur développe même des recherches sur la provenance du bois sur laquelle nous nous appuierons pour la suite de notre analyse. Ce travail a ensuite été publié en 1987, dans un ouvrage « Hommes de fer en Périgord » (Lamy, 1987). Finalement, dans cette synthèse, la majorité des informations concernant les quantités de métal produites ont été mises de côté pour laisser une plus grande part à l'approche sociologique du monde ouvrier et à la place de la métallurgie dans une société essentiellement rurale.

Dans les années 1990, ces recherches se poursuivent et portent désormais sur un bassin versant : « la vallée de la Dronne et ses affluents ». Ce travail permet d'obtenir quelques dates clés sur l'histoire de la métallurgie dans cette vallée et apporte également quelques informations sur les quantités de métal produites (Lamy, 1992).

Enfin, nous citons ici rapidement d'autres documents dans lesquels nous avons pu récolter quelques informations. Il s'agit de l'ouvrage, plus grand public, « Au temps où le Périgord Limousin Angoumois canonnait en Atlantique » (Magne, 2005) et un mémoire de recherche de

master « Les industries rurales du Nontronnais (vers 1540 – vers 1860), approches historiques et archéologiques » (Lacour, 2009). Moins riches en données quantitatives, ces derniers nous ont surtout servi à approfondir notre connaissance sur l'histoire de la métallurgie en Périgord Limousin.

A partir de ces travaux nous avons pu recenser l'ensemble des données disponibles sur les productions de fonte et de fer pour un grand nombre d'établissements sidérurgiques du Périgord Limousin, et cela sans le dépouillement des archives, qui nécessite un temps de recherche considérable.

2.2.2. Centraliser l'information : l'intérêt d'une base de données

Dans chacun des ouvrages que nous avons consultés et présentés précédemment, nous avons extrait l'ensemble des données de production de fonte, de fer, le nombre de produits finis (canons, chaudières, etc.), ainsi que les informations concernant la consommation en matière première. Afin de simplifier l'enregistrement et la saisie des données, une base de données avec une interface web a été mise en place (Crouzevialle et Paradis, 2008, 2009 ; Paradis-Grenouillet et Crouzevialle, 2010).

Afin d'être le plus complet possible lors de la saisie des données et pour permettre une analyse diachronique, la base de données a été construite sur la base de deux types de formulaire liés entre eux (figure 4).

Le premier formulaire consiste à renseigner l'ensemble des informations générales pour chaque forge : localisation, date de construction, date d'arrêt de fonctionnement, documents d'archives et ouvrages de synthèse disponibles etc. (figure 4 B). Chaque forge a fait l'objet d'une saisie et pour chacune d'elles les coordonnées géographiques sont systématiquement associées, ceci permettant de proposer par la suite une véritable analyse spatiale par le biais d'un Système d'Information Géographique.
Le second formulaire permet dans un second temps de renseigner des données plus précises qui ne correspondent qu'à une année ou une période donnée (figure 4 C). Ce dernier appelé « Détails chronologiques » permet ainsi d'enregistrer les noms des propriétaires, des exploitants et d'indiquer la consommation en minerai, castine, fonte et charbon de bois

etc. ainsi que la production de fonte et de fer. Pour chaque information saisie nous avons tenu à conserver les unités de mesures employées par les différents auteurs et à indiquer la source en mentionnant l'auteur de l'ouvrage et la page. Il est ainsi possible de vérifier qu'aucune erreur de retranscription n'a été commise. Lors des relevés nous avons bien distingué les productions de fonte (issue de la réduction du minerai dans les hauts fourneaux) des productions de fer (issue de l'affinage de la fonte dans les foyers d'affineries).

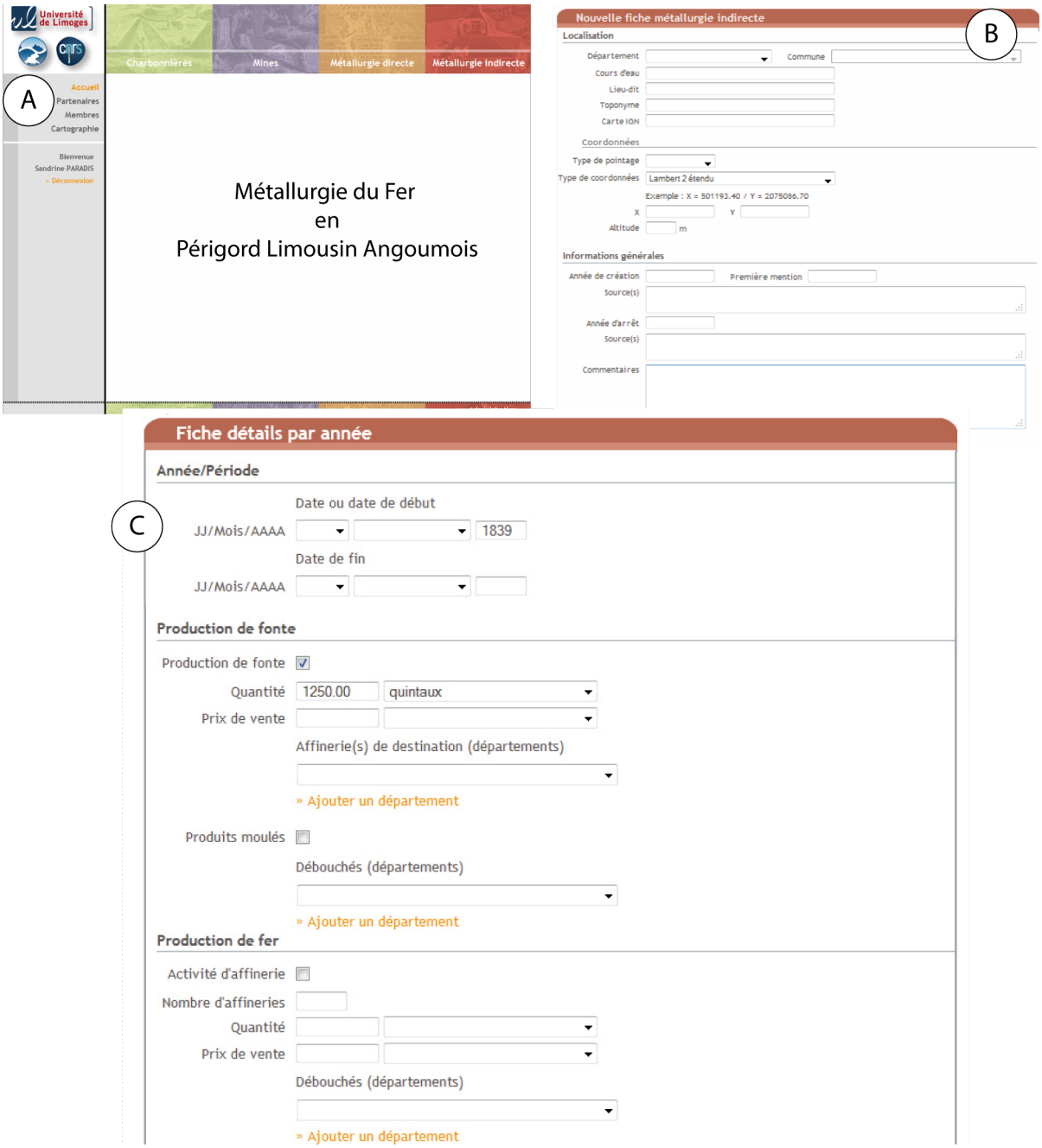


Figure 4 : Présentation de la base de données. A : Page d'accueil. B : Extrait du formulaire d'informations générales avec la localisation de chaque établissement. C : Extrait du formulaire « détails chronologiques »)

Les données portant sur la consommation en charbon de bois étant finalement très lacunaires, dans le cadre de ce travail ce sont les productions de fonte et de fer qui ont été employées pour évaluer les surfaces forestières nécessaires au fonctionnement des forges.

A ce jour, 108 productions annuelles de fonte sont enregistrées correspondant à 34 forges sur les 46 hauts fourneaux connus. Ce sont généralement les mêmes forges qui sont renseignées sur plusieurs années. Comme nous l'avons vu lors de la présentation des ouvrages utilisés dans le cadre de cette étude, la majorité des travaux réalisés sur le Périgord a porté sur des enquêtes réalisées à l'échelle nationale pour quelques dates clés : 1772, 1788, 1789, 1808, 1811 et 1839. Pour chacune de ces années au moins dix forges présentent des données de production de fonte.

En ce qui concerne les productions annuelles de fer, le nombre de données est plus important que les productions annuelles de fonte. En effet, à ce jour nous comptons 273 données, réparties sur 89 forges. Comme pour les productions de fonte, l'essentiel des données est concentré sur les mêmes années. Aux établissements produisant à la fois de la fonte et du fer s'ajoutent ceux ne procédant qu'à la phase d'affinage de la fonte ce qui explique le plus grand corpus de données pour les productions de fer. Sur les 89 forges présentant des informations sur la production de fer, 58 n'indiquent pas de production de fonte. On peut se poser la question de la fonction de ces établissements. Ont-ils pour seule vocation de produire du fer, ou bien les quantités de fonte n'ont-elles pas été mentionnées ? Les deux cas sont envisageables. En effet, bon nombre de ces forges ne procèdent qu'à la phase d'affinage ; en revanche, dans certains contextes la production de fonte ne peut être exclue. C'est notamment le cas de la forge de Lamaque dans la vallée de la Dronne. Cette forge est indiquée dans de nombreux ouvrages comme étant une simple affinerie (Peyronnet, 1958 ; Lamy, 1987 ; Magne, 2005) ; or lors d'une visite de cette forge nous avons pu observer les restes d'un haut fourneau, par ailleurs bien restauré. La production de fonte sur ce site est également attestée par la présence de vestiges de laitiers. Pourtant à ce jour, à la lecture des textes, aucun auteur n'a identifié ce type de production pour cette forge.

A partir de l'ensemble des données saisies il est alors envisageable de développer une approche à la fois spatiale et temporelle pour étudier l'histoire de la métallurgie en Périgord Limousin et son impact sur les forêts. Cependant, l'essentiel de ces données a déjà fait l'objet de traitements, de conversions, ce qui rend cette information moins fiable que les données obtenues à partir de l'étude des documents d'archives.

2.2.3. Avantages et limites à l'utilisation de données déjà interprétées. Le problème de la variété des systèmes de mesure

Utiliser des données déjà retranscrites dans différents ouvrages permet l'acquisition rapide d'un grand nombre de données ; la simple lecture de ces ouvrages permet d'obtenir des données de productions de fonte et de fer. En revanche, ces données déjà traitées, sont souvent modifiées pour homogénéiser l'ensemble de l'information présentée au lecteur. Mis à part les résultats de l'enquête statistique générale de la Haute Vienne de 1808 (Texier-Olivier, 1808), l'ensemble des autres documents ont fait l'objet de retranscription et probablement de conversions des unités de mesure pour en facilité la lecture.

Avant 1789 les systèmes de mesure variaient de façon importante selon les régions, parfois même à l'échelle du canton. Il est surprenant de trouver dans certains ouvrages des productions toutes dans le même système de mesure, alors que les forges sont localisées dans des secteurs bien différents. Cela est bien identifiable dans le travail de Peyronnet, ce dernier reprend les données de l'enquête de Texier Olivier de 1808 et n'exprime pas les données dans le même système de mesure que ce dernier. Prenons l'exemple de la forge de Champagnac la Rivière. Dans la statistique générale de la Haute Vienne il est écrit : « *Le fourneau demeure en activité pendant quatre mois de l'année et produit 20 000 myriagrammes de fonte en gueuse ; il consomme 50 000 myriagrammes de minerai, 27 000 myriagrammes de charbon, 12 500 myriagrammes de castine […]* » (Texier-Olivier, 1808, p. 398). A partir des mêmes données Peyronnet écrit : « *Production : 2 000 quintaux de fonte en gueuse ; Consommation : 5 000 quintaux de minerai, 2 700 quintaux de charbon et 1 250 quintaux de castine* » (Peyronnet, 1958, p. 184). On voit ici que Peyronnet a réalisé les conversions et emploie les quintaux plutôt que les myriagrammes. Lors des traitements de données nous avons alors uniquement conservé les données de Texier-Olivier.

De plus, à travers ces citations on observe un problème majeur. En effet, Peyronnet exprime les quantités en quintaux sans indiquer s'il s'agit de quintaux anciens utilisés avant 1789 ou de quintaux métriques établis en 1789. Compte tenu de la grande diversité des unités de mesure et des problèmes que cela peut engendrer lors des conversions il nous semble important de faire le point sur l'ensemble des unités de mesure rencontrées dans la région étudiée et d'établir des tableaux de conversions sur lesquels nous pourrons nous

appuyer pour la suite de l'étude.

Ce travail d'inventaire des unités de mesure a été réalisé à partir des travaux précédemment cités, chaque auteur ayant répertorié l'ensemble des unités de mesure qu'il a rencontré en y associant la correspondance dans notre système métrique actuel. En réalisant cette synthèse, il est possible de mesurer l'ampleur de la diversité des unités de mesure employées.

Si les unités de mesure de distance et de surface ne varient pas considérablement (figure 5 A), en revanche, les unités de volume et de masse montrent une large gamme d'appellations, toutes présentant des mesures très différentes (figure 5 B et C).

A

DISTANCES	UNITES ANCIENNES	UNITES ACTUELLES
Brasse		1,62 m
Lieue commune	2,283 toises	4,4496 m
Ligne	1/12 pouce	0,22558 cm
Pied du roi	1/6 toise	0,32484 m
Point	1/12 ligne	0,188 mm
Pouce	1/12 pied	2,707 cm
Toise		1,949 m

SURFACE	UNITES ANCIENNES	UNITES ACTUELLES
Arpent commun		4221 m²
Arpent des Eaux et Forêt		5107,2 m²
Journal		4000 m²
Lieue carrée		19,789 km²
Ligne carrée	1/444 pouce carré	0,0509 cm²
Pied carré	1/36 toise carrée	0,1055 m²
Pouce carrée	1/144 pied carré	7,3278 cm²
Toise carrée		3,7987 m²

B

VOLUME	UNITES ANCIENNES	UNITES ACTUELLES
Brasse / Corde *		Environ 4m^3
Toise cube		7,40389 m^3
Pied cube		34,277 dm^3
Pouce cube		19,836 cm^3
Ligne cube		11,479 mm^3

* La brasse et la corde présentent une grande variabilité, elles ont fait l'objet d'une étude plus détaillée

C — Brasses et Cordes retrouvées dans les travaux de Peyronnet

	LONGUEUR	LARGEUR	HAUTEUR	VOLUME
Brasse	13,5 pieds	3 pieds 3 pouces	3 pieds 3 pouces	4,8 m^3
Brasse	1,949 m	1,029 m	1,949 m	3,9 m^3
Brasse	2 m	1,16 m	2 m	4,6 m^3
Brasse	40 pieds²		3 pieds 3 pouces	4,5 m^3
Brasse	4 m	1 m	1 m	4,0 m^3
Brasse	2,66 m	1,15 m	1,6 m	4,9 m^3
Brasse	2,11 m	2,111 m	1,056 m	4,7 m^3
Corde	4,4 m	1,1 m	1,2 m	5,8 m^3
Corde	8 pieds	4 pieds	4 pieds	4,4 m^3
Corde	12 pieds	3 pieds	3 pieds	3,7 m^3
Corde	3,8968 m	1 m	1 m	3,9 m^3
Corde	8 pieds	3,5 pieds	5 pieds	4,8 m^3
Corde	8,5 pieds	3,5 pieds	5,5 pieds	5,6 m^3
Corde	12 pieds 2 pouces	3 pieds 2 pouces	3 pieds 2 pouces	4,2 m^3
Corde	6 pieds	3 pieds 3 pouces	6 pieds	4,0 m^3
Corde	2 m	1 m	2 m	4,0 m^3
Corde	6 pieds	3 pieds	6 pieds	3,7 m^3
Corde	12 pieds	3 pieds	3 pieds 3 pouces	4,0 m^3
Corde	8 pieds	6 pieds	3,5 pieds	5,8 m^3
Corde	8 pieds	3 pieds	5 pieds	4,1 m^3
Corde	2,11 m	1,111 m	1,56 m	3,7 m^3
Moyenne				**4,4 m^3**
Ecart type				**0,7 m^3**
Pourcentage d'erreur				**6,5%**

Unités de mesures rencontrées dans les travaux de Pijassou (1957), de Peyronnet (1958), de Gille (1960), de Bouchillou (1986), Lamy (1984)

Figure 5 : Synthèse de l'ensemble des unités de mesures anciennes avec leur valeur dans le système métrique actuel. A : Unité de distance et de surface. B : unité de volume. C : Détail des cordes et des brasses observées dans le secteur du Périgord Limousin et mentionnées par Peyronnet (1958)

En ce qui concerne les unités de volume, ce sont « les brasses » et les « cordes » qui présentent la plus grande diversité de contenance. E. Peyronnet, a retranscrit dans son ouvrage un grand nombre de « cordes » et de « brasses » (Peyronnet, 1958). Ces deux appellations font référence à une mesure physique. Une « corde » de bois était évaluée à l'aide d'une corde dont la longueur était propre à chaque région. Une « brasse » correspondait à la longueur de l'envergure entre les bras. Ces mesures varient donc de façon importante d'une région à l'autre. Parmi les documents étudiés dans le cadre de cette recherche nous avons pu recenser 14 cordes et 7 brasses différentes (figure 5 C). Ces deux appellations présentent des contenances très similaires et semblent être employées de façon indifférenciée. Les valeurs répertoriées sont comprises entre 3,7 m^3 et 5,8 m^3. Certains auteurs précisent la nature des cordes qu'ils emploient (Lamy, 1984 ; Peyronnet, 1958) mais ce n'est pas toujours le cas ; il est alors difficile de choisir la correspondance à employer pour établir les conversions. Pour pallier ce problème une corde moyenne a été calculée pour l'ensemble du secteur du Périgord Limousin. Celle-ci, évaluée à 4,4 m^3, est légèrement supérieure à la corde actuelle. Afin d'être le plus précis et de prendre en considération la diversité des contenances de ces appellations, l'intervalle de confiance de cette moyenne a été calculé (figure 6).

$$\left[\overline{x} - \frac{\sigma(X)}{\sqrt{n}}; \overline{x} + \frac{\sigma(X)}{\sqrt{n}}\right] = \left[4{,}4 - \frac{0{,}7}{\sqrt{21}} ; 4{,}4 + \frac{0{,}7}{\sqrt{21}}\right] = \left[4{,}1 ; 4{,}7\ m^3\right]$$

Figure 6 : Mode de calcul de l'intervalle de confiance en prenant en considération un écart type

La moyenne de la corde est donc comprise entre 4,1 m^3 et 4,7 m^3 ce qui correspond à 4,4 m^3 +/- 0,3 m^3. Ainsi en l'absence de correspondance de volume de la corde ou de la brasse, cette corde ou brasse moyenne est employée pour établir les conversions.

Pour la mesure des masses, on constate également une grande variabilité (figure 7). Par exemple la fondue présente des valeurs très différentes. En Nontronnais et en Charente elle vaut 15 tonnes, alors qu'elle en vaut 33 pour les régions d'Excideuil et de Hautefort (Lamy, 1987). De tels écarts ne nous permettent pas de calculer une moyenne comme pour les « brasses » ou les « cordes ». Il nous faut donc être très vigilant quant à l'utilisation de ces données et bien s'assurer du système de mesure employé par l'auteur.

Les mesures en « bacs » posent également quelques problèmes. On retrouve des mesures de « bac » pour chaque type de matière première employée, et la masse varie donc de façon importante entre un bac de minerai brut, de minerai trié, mais la différence

est encore plus importante lorsqu'il s'agit de bacs de charbon de bois. Cette différence s'explique simplement par la transformation d'unités de mesure de volume en masse. Le bac ou encore la fondue sont en réalité des sacs ou des paniers ayant une contenance qui pourrait s'exprimer en litre ; la masse de ce volume ne sera donc pas la même pour un minerai brut - c'est à dire encore chargé de la gangue - que pour un minerai trié et lavé. Les différences régionales s'expliquent donc par un emploi de paniers ou de sacs de tailles différentes.

QUANTITES	UNITES ANCIENNES	UNITES ACTUELLES	SOURCE(S)
Banne		65,10 kg	
Bac		70 kg	Pijassou, 1959
		46 kg	Pijassou, 1959
		125 kg	Lamy, 1987
Bac de minerai brut		400 kg pour le Nontronnais et la charente	Lamy, 1987
		125 kg pour Excideuil et Hautefort	Lamy, 1987
Bac de minerai lavé		300 kg pour le Nontronnais et la charente	Lamy, 1987
		95 kg pour Excideuil et Hautefort	Lamy, 1987
Bache		56 kg	Bouchillou, 1986 Pijassou, 1959
Bache de minerai au fourneau		25 kg	Lamy, 1987
Cent	1 quintal ancien	48,95 kg	Peyronnet, 1958
Charretée		1300 kg	Pijassou, 1954 Lamy, 1987
Charge	6 respes	87 kg	Pijassou, 1959
Charge charbon		150 kg	Pijassou, 1959
Charge minerai		200 à 250 kg	Pijassou, 1959
Charge castine		75 kg	Pijassou, 1959
Fondue		15 tonnes pour le Nontronnais et la Charente	Lamy,1987 Pijassou, 1959
		33 tonnes pour Excideuil et Hautefort	Lamy, 1987
Livre du roi / livre poids de marc	16 onces	489,5 g	Peyronnet, 1958
Livre métrique		500 g	Peyronnet, 1958
Marc	8 onces	244,75 g	Peyronnet, 1958
Millier ancien	1000livres	489,5 kg	
Millier métrique		1000kg	
Myriagramme		10 kg	
Picotin		15 kg	Lamy, 1987
Once		30,594 g	Peyronnet, 1958
Quintal ancien	100 livres	48,95 kg	
Quintal métrique		100 kg	
Rasse/ Respe		14,5 kg	Lamy, 1987
		22 à 26kg	Pijassou, 1959
Sac		50k g	Lamy, 1987

Figure 7 : Synthèse des unités de masse retrouvées dans la bibliographie, principalement dans les ouvrages de Lamy 1987, Peyronnet 1958, et Pijassou, 1959)

Les données proposées pour les dates antérieures à 1789 sont généralement exprimées

dans ces systèmes de mesure particulièrement hétérogènes d'une forge à l'autre. Néanmoins, il arrive que certaines quantités soient dans un système de mesure commun à l'ensemble de la France. Ce système proche du système de mesure métrique s'exprime en livre du roi, en quintal et en millier ; chacun d'eux valant respectivement 489,5 g, 48,95 kg et 489,5 kg.

La Révolution française marque un tournant dans l'utilisation des systèmes de mesure en les homogénéisant. A partir de cette date les unités de masse employées sont : la livre, le quintal métrique et le millier métrique qui valent respectivement 500 g, 100 kg et 1000 kg. Ce système plus simple à employer rend l'analyse plus aisée. En revanche, comme nous l'avons précédemment évoqué, certains auteurs emploient les termes « milliers » ou « quintal » de façon indifférenciée entre les anciens et les métriques. Il est alors nécessaire d'être particulièrement critique lors de l'utilisation de ces données.

Conscient de l'ensemble des biais inhérents à l'utilisation de documents de synthèse, une approche méthodologique a été développée permettant de restituer des surfaces forestières exploitées à partir des productions de fonte et de fer.

2.2.4. Homogénéiser l'information : étape importante de la conversion des données

Lors de la saisie des données nous avons retenu le système de mesure choisi par chaque auteur. Il a donc fallu procéder à des conversions pour homogénéiser l'ensemble des informations dans le système métrique actuel. Pour cela chaque donnée a été étudiée individuellement afin d'affiner la conversion au secteur géographique et à la période de la production du métal.

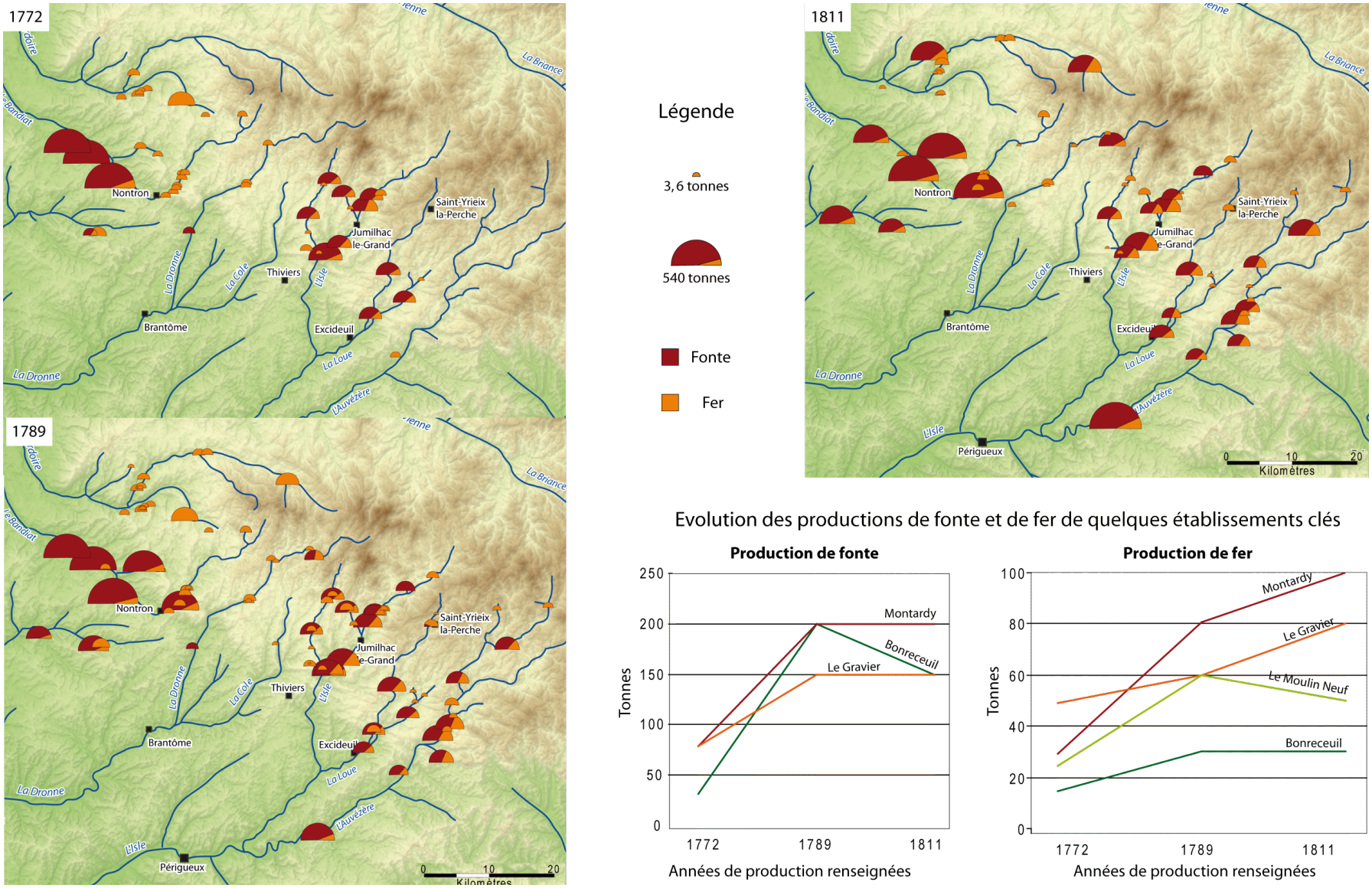


Figure 8 : Cartes de présentation des données de production saisies dans la base de données pour les trois années les plus renseignées 1772, 1789 et 1811

L'ensemble des données recensées dans la base de données a été lié au Système d'Information Géographique permettant de cartographier les productions de fonte et de fer pour les trois années les plus renseignées (figure 8). On peut ainsi observer d'une part les établissements pour lesquels nous avons des données, et d'autre part les évolutions des quantités de métal produit sur près d'un demi-siècle. L'année 1772 présente un nombre de données nettement inférieur aux deux autres années. En effet, seule la région Aquitaine est renseignée grâce au travail de Gille (1960). A la lecture de ces cartes on observe également quelques établissements qui ne produisaient que du fer au cours des années 1772 et 1789, et l'on voit apparaitre en 1811 une production de fonte ; c'est notamment le cas de la forge de la Rivière en Haute Vienne. Si l'on regarde maintenant l'évolution des productions de fonte et de fer de quelques établissements, on observe des fonctionnements différents notamment entre les années 1789 et 1811. Il semblerait que, quelle que soit la forge, entre 1772 et 1789 les productions de fonte et de fer ont largement augmenté, celles ci étant souvent doublées. En revanche, entre les années 1789 et 1811, on voit quelques forges qui se stabilisent, notamment pour les productions de fonte alors que d'autres réduisent de façon considérable leur production, comme la forge de Bonreceuil en Charente. En ce qui concerne les productions de fer, la majorité des forges présente une évolution positive des productions, seules quelques forges semblent péricliter, c'est le cas de la forge du Moulin Neuf.

2.3. De la production de fonte et de fer aux surfaces de forêts exploitées

Remonter aux surfaces de forêts exploitées à partir des quantités de fonte et de fer nécessite de conduire une démarche par étape. Dans un premier temps il s'agit de retrouver le rendement des hauts fourneaux et des affineries pour évaluer la quantité de charbon de bois nécessaire à la production d'une tonne de fonte et d'une tonne de fer. Les quantités de charbon de bois sont bien différentes pour produire une tonne de fonte et une tonne de fer, c'est pourquoi il est primordial de bien séparer ces deux étapes et de calculer pour chacune les rendements entre quantité de charbon et quantité de métal produite.

Dans un second temps il faut évaluer le volume de bois nécessaire pour produire une tonne de charbon de bois. Enfin pour remonter aux surfaces forestières nécessaires pour

alimenter les forges, il faut évaluer le rendement de différents types de peuplement forestier en prenant en considération les durées moyennes de révolution, les types d'essences etc.
Il s'agit donc de mettre en place deux types de ratios : établir les rendements au sein des complexes sidérurgiques c'est à dire d'évaluer le rapport entre « quantité de fonte / quantité de charbon de bois », et « quantité de fer / quantité de charbon de bois », puis d'évaluer les rendements pour la production de charbon de bois ce qui revient à établir les ratios « quantité de charbon de bois / volume de bois » et « volume de bois / surface forestière ». (figure 9)

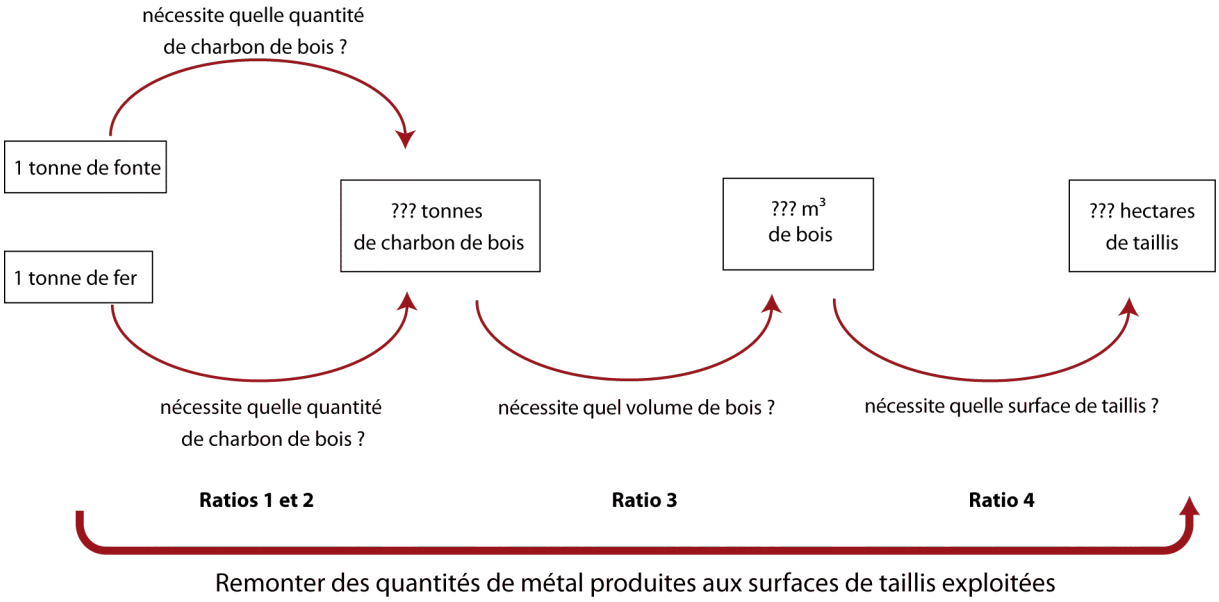


Figure 9 : Schéma de synthèse permettant d'identifier les quatre ratios nécessaires à établir pour permettre une estimation des surfaces de bois indispensables au fonctionnement des forges

Ces rendements existent dans la littérature, mais ils sont appliqués à d'autres contextes régionaux et temporels (Andrieux, 1987 ; Woronoff, 1990 ; Charnoz, 2003); nous souhaitons établir des ratios propres au Périgord Limousin. Pour cela nous avons recensé l'ensemble des mentions mettant en relation des productions de fonte ou de fer avec des quantités de charbon de bois dans les différents ouvrages étudiés.

2.3.1. Estimation de la quantité de charbon de bois nécessaire pour produire une tonne de fonte

Dans un premier temps, il s'agit d'évaluer la quantité de charbon de bois nécessaire pour produire une tonne de fonte. Parmi l'ensemble des ouvrages consultés ce sont ceux de Texier-Olivier (1808), de Peyronnet (1958) et de Pijassou (1959) qui nous ont permis de calculer un rendement moyen des hauts fourneaux du Périgord Limousin.

Dans ces trois ouvrages on retrouve pour différentes forges le détail des productions de fonte ainsi que les quantités associées aux matières premières consommées (minerai, charbon de bois, castine etc.) Prenons comme exemple une citation de Texier-Olivier dans l'enquête sur la Haute Vienne menée en 1808 : « *le haut fourneau [la forge de Chauffaille près de Saint Yrieix la Perche] est en feu pendant trois mois de l'année, ses produits sont de 15 000 myriagrammes de fonte en gueuse, il consomme 33 500 myriagrammes de minerai, 18 300 myriagrammes de charbon de bois et 8 375 myriagrammes de castine* » (Texier-Olivier, 1808, p. 403).

Dans le cadre de cette étude, seules les quantités de charbon de bois associées à des quantités précises de fonte produite ont été relevées. Aujourd'hui nous comptons 12 mentions permettant d'évaluer le rendement des hauts fourneaux du Périgord Limousin (figure 10 A).

L'ensemble des données relevées a ensuite été converti dans le système de mesure actuel afin d'obtenir les rendements des différentes usines mentionnées par les auteurs (figure 10 B). C'est à partir de toutes ces valeurs de rendement que nous avons pu établir un rendement moyen pour les forges du Périgord Limousin. Afin de prendre en considération la diversité des mesures, l'intervalle de confiance associé à la valeur moyenne a également été calculé (figure 10 C).

La quantité de charbon moyenne pour produire une tonne de fonte est ainsi évaluée à un intervalle compris entre 1,2 et 1,5 tonne de charbon de bois.

A Données retrouvées dans les textes et les documents de synthèse traitant du Périgord Limousin

Année	Nom de la forge ou secteur	CHARBON	= FONTE	SOURCE
1761	La chapelle Saint Robert	12 charges	3046 livres	Pijassou p 188
1774	Jomelière	40 quintaux	22 quintaux	Peyronnet p 91
1789	Chauffaille	20 bannes	1428 kg	Peyronnet p 252
1808	Champagnac la Rivière	27000 myriagrammes	20000 myriagrammes	Texier-Olivier p 398
1808	Chauffaille	15000 myriagrammes	12500 myriagrammes	Texier-Olivier p 404
1808	Forges de St Yrieix la Perche	18300 myriagrammes	15000 myriagrammes	Texier-Olivier p 403
1808	La Faye	1500 quintaux métriques	1250 quintaux métriques	Peyronnet p 187
1812	Forge de la Dordogne	12 quintaux métriques	1 tonne	Pijassou p 152
1812	Forge du Nontronnais	15,6 quintaux métriques	1 tonne	Pijassou p 153
1812	Forge du Nontronnais	2,878 tonnes	1,933 tonne	Pijassou p 153
1830	La Mothe	783 tonnes	525,85 tonnes	Pijassou p 153
1882	La Mothe	2,878 tonnes	1,933 tonne	Pijassou p 190

Quantité de charbon nécéssaire pour produire la fonte

B Données converties dans le système métrique

Ratio établi pour chaque forge permettant de connaître le tonnage de charbon nécessaire pour produire une tonne de fonte

Année	Nom de la forge ou secteur	CHARBON (t)	= FONTE (t)	RATIO (t)
1761	La chapelle Saint Robert	1,8	1,489	1,21
1774	Jomelière	1,958	1,076	1,82
1789	Chauffaille	1,302	1,428	0,91
1808	Champagnac la Rivière	270	200	1,35
1808	Chauffaille	150	125	1,20
1808	Forges de St Yrieix la Perche	183	150	1,22
1808	La Faye	150	125	1,20
1812	Forges de la Dordogne	1,2	1	1,20
1812	Forge du Nontronnais	2,878	1,933	1,49
1812	Forge du Nontronnais	1,56	1	1,56
1830	La Mothe	783	525,85	1,49
1882	La Mothe	2,878	1,933	1,49

C Calcul du rendement moyen

Statistiques descriptives

L'intervalle de confiance est calculé à partir de la formule ci dessous

$$\left[\overline{x} - \frac{\sigma(X)}{\sqrt{n}}; \overline{x} + \frac{\sigma(X)}{\sqrt{n}}\right]$$

Valeur moyenne	1,34 t
Valeur maximale	1,82 t
Valeur minimale	0,91 t
Nombre de données	12
Ecart type	0,24 t
Intervalle de confiance 1	1,21 t
Intervalle de confiance 2	1,48 t
Marge d'erreur	0,14 t
Pourcentage d'erreur	10,17 %

Pour produire une tonne de fonte il faudrait entre 1,2 et 1,5 tonne de charbon de bois

Figure 10 : Recensement et conversions des données mettant en relation la consommation de charbon de bois pour produire de la fonte (A et B) pour calculer le rendement moyen en Périgord Limousin (C)

Un faible nombre de données met en lien la consommation de charbon de bois avec la production de fonte produite. En effet, à travers les travaux sur d'autres régions françaises, les rendements sont souvent évalués sur l'ensemble de la chaine opératoire, associant ainsi les quantités charbon de bois employées pour l'étape de réduction avec celles utilisées pour affiner les gueuses de fonte. Si l'on compare nos résultats avec les rares mentions relevées dans d'autres ouvrages, les ratios obtenus sont cohérents. En effet, Levainville évoque une consommation de 1,035 tonne de charbon de bois pour produire une tonne de fonte pour l'ensemble des hauts fourneaux français (Levainville, 1922). Quant à Charnoz, traitant uniquement de la métallurgie en Forêt de Chaux, il propose une consommation de charbon de bois légèrement supérieure avec 1,6 tonne de charbon de bois pour produire 1 tonne de fonte (Charnoz, 2003).

2.3.2. Etablir un rendement moyen pour le procédé d'affinage

S'il arrive que la fonte soit directement employée, comme pour la production de canons, dans la majorité des cas, la fonte doit être affinée pour retirer les excès de carbone du métal.

La phase d'affinage de la fonte pour produire des objets en fer nécessite également d'importantes quantités de charbon de bois. Nous avons donc recherché à établir une valeur moyenne de rendement des affineries du Périgord Limousin. Comme pour le rendement obtenu pour produire une tonne de fonte, nous avons recensé l'ensemble des mentions associant à des quantités de fer les quantités de matières premières employées. Prenons par exemple, les résultats de l'enquête « Texier Olivier » de 1808 : « *il faut 13 500 myriagrammes de charbons de bois pour alimenter les deux affineries, dont la fabrication totale est de 9 000 myriagrammes de fer battu* » (Texier-Olivier, 1808, p. 403).

Mais calculer un rendement moyen pour le procédé d'affinage est un peu plus complexe que pour la production de fonte. En effet, les affineries produisent différents types de fer, chacun d'eux étant adapté à différents usages. Fer doux, fer mou, fer dur ou encore fer bâtard, nécessitent des traitements particuliers et donc requièrent des quantités de charbon de bois plus ou moins importantes. Il ne s'agit pas ici d'établir un ratio pour chacun des fers produits, d'autant plus que dans les données saisies, rares sont celles où le type de fer est renseigné. Il s'agit alors d'établir un rendement moyen utilisable pour l'ensemble des

affineries ; la diversité des rendements est tout de même prise en considération par le biais des calculs des marges d'erreurs systématiquement associées à la valeur moyenne.
A ce jour, 22 mentions de quantités de charbon associées à des productions de fer sont enregistrées (figure 11 A). Comme pour la production de fonte, l'ensemble des données recensées est soit dans le système de mesure utilisé à l'époque du relevé (Texier-Olivier, 1808), soit dans le système choisi par les auteurs ayant étudié les archives ; dans ce cas les données sont souvent exprimées dans le système métrique établi à la Révolution française (livres, quintaux métriques et milliers métriques) (Pijassou, 1954 ; Peyronnet, 1958 ; Bouchillou, 1986). Afin d'établir le rendement moyen des affineries du Périgord Limousin, chaque donnée a été convertie dans le système métrique actuel (figure 11 B).

A partir de l'ensemble de ces données nous avons pu calculer le rendement moyen ainsi que les intervalles de confiance plus adaptés à employer pour la suite de l'étude. Pour produire une tonne de fer, il fallait donc entre 1,6 tonne et 2,4 tonnes de charbon de bois (figure 11 C). Le ratio obtenu est tout à fait cohérent avec les rendements établis par les quelques auteurs indiquant uniquement les rendements des affineries dans d'autres régions françaises. En effet, Charnoz démontre que les affineries de la forêt de Chaux utilisaient 1,8 tonne de charbon de bois pour produire une tonne de fer (Charnoz, 2003).

Comme nous l'avons précédemment mentionné, la plupart des auteurs travaillant sur les rendements des activités sidérurgiques en France calculent la quantité de charbon de bois nécessaire en combinant la phase de réduction et la phase d'affinage. « *On arrive ici à ces données représentant en définitive la consommation de 4 kilos de charbon de bois pour obtenir un kilo de fer* » (Dornic, 1984, p. 12). Si l'on additionne les rendements obtenus à partir de notre analyse on obtient un intervalle légèrement inférieur à celui proposé par F. Dornic mais qui reste toutefois cohérent : 2,83 et 3,85 kg.

(A) Données retrouvées dans les textes et les documents de synthèse traitant du Périgord Limousin

Année	Nom de la forge ou secteur	CHARBON	= FER	SOURCES
1789	Chauffaille	18 bannes[1]	1 millier métrique	Peyronnet p 252
1789	Dordogne	35 quintaux métriques	10 quintaux métriques	Peyronnet p 192
1789	Forge des Beiges	45 quintaux métriques	10 quintaux métriques	Peyronnet p 248
1789	La couade	27 quintaux métriques	1 millier métrique	Peyronnet p 254
1789	Le Buisson	27 quintaux métriques	1 millier métrique	Peyronnet p 257
1808	Baudy	6000 myriagrammes	4000 myriagrammes	Texier-Olivier p 405
1808	Champagnac la rivière	30000 myriagrammes	20000 myriagrammes	Texier-Olivier p 400
1808	Chauffaille	1350 quintaux métriques	900 quintaux métriques	Peyronnet p 187
1808	Chauvert- La forge Neuve	9000 myriagrammes	6000 myriagrammes	Texier-Olivier p 405
1808	Forge de Bessous	12000 myriagrammes	8000 myriagrammes	Texier-Olivier p404
1808	Forge de chauffaille	13500 myriagrammes	9000 myriagrammes	Texier-Olivier p403
1808	Forges du Buisson et de Peyre-soulat	28500 myriagrammes	19000 myriagrammes	Texier-Olivier p 401
1808	Forges de la Couade et des Séchères	7125 myriagrammes	4750 myriagrammes	Texier-Olivier p401
1808	Forges des Beiges	1200 quintaux métriques	800 quintaux métriques	Peyronnet p 187
1808	Haute Vienne	192550 myriagrammes	126350 myriagrammes	Texier-Olivier p 406
1808	La Faye	11250 myriagrammes	7500 myriagrammes	Texier-Olivier p 405
1808	L'étang dernier	6000 myriagrammes	4000 myriagrammes	Texier-Olivier p 405
1808	Leyssart	6000 myriagrammes	4000 myriagrammes	Texier-Olivier p 405
1808	Forges de Marsaguet et de la Ceylarie	9000 myriagrammes	6000 myriagrammes	Texier-Olivier p 405
1812	Forges du Nontronnais	35 quintaux métriques	1 millier métrique	Pijassou p 152
1812	Forges du Nontronnais	25 quintaux métriques	1 millier métrique	Pijassou p 152
1812	Forges du Nontronnais	22 quintaux métriques	1 tonne	Pijassou p 152

[1] Banne = 65,1 kilogrammes

Quantité de charbon nécéssaire pour produire tout type de fer

(B) Données converties dans le système métrique

Année	Nom de la forge ou secteur	CHARBON (t)	= FER (t)	RATIO (t)
1789	Chauffaille	1,1718	1	1,17
1789	Dordogne	3,5	1	3,50
1789	Forge des Beiges	4,5	1	4,50
1789	La couade	2,7	1	2,70
1789	Le Buisson	2,7	1	2,70
1808	Baudy	60	40	1,50
1808	Champagnac la rivière	300	200	1,50
1808	Chauffaille	135	90	1,50
1808	Chauvert- La forge Neuve	90	60	1,50
1808	Forge de Bessous	120	80	1,50
1808	Forge de chauffaille	135	90	1,50
1808	Forges du Buisson et de Peyre-soulat	285	190	1,50
1808	Forges de la Couade et des Séchères	71,25	47,5	1,50
1808	Forges des Beiges	120	80	1,50
1808	Haute Vienne	1925,5	1263,5	1,52
1808	La Faye	112,5	75	1,50
1808	L'étang dernier	60	40	1,50
1808	Leyssart	60	40	1,50
1808	Forges de Marsaguet et de la Ceylarie	90	60	1,50
1812	Forge du Nontronnais	3,5	1	3,50
1812	Forge du Nontronnais	2,5	1	2,50
1812	Forge du Nontronnais	2,2	1	2,20

Ratio établi pour chaque forge permettant de connaître le tonnage de charbon nécessaire pour produire une tonne de fer

(C) Mise en place d'une valeur moyenne de quantité de charbon de bois nécessaire

Statistiques descriptives

Valeur moyenne	1,99 t
Valeur maximale	4,50 t
Valeur minimale	1,17 t
Nombre de données	22
Ecart type	0,88 t
Intervalle de confiance 1	1,62 t
Intervalle de confiance 2	2,37 t
Marge d'erreur	0,37 t
Pourcentage d'erreur	18,8 %

Pour produire une tonne de fer il faudrait entre 1,6 et 2,4 tonnes de charbon de bois

Figure 11 : Recensement et conversions des données mettant en relation la consommation de charbon de bois pour produire du fer (A et B) pour calculer le rendement moyen en Périgord Limousin (C).

2.3.3. Evaluer le rendement des charbonnières

Retrouver les quantités de charbon de bois nécessaires n'est pas suffisant pour évaluer l'emprise de ces activités métallurgiques sur le couvert forestier ; il est important de transposer ces masses de charbon de bois en volumes de bois permettant ensuite d'aller jusqu'à l'évaluation des surfaces de forêt. Les ouvrages sur lesquels nous nous sommes appuyés pour étudier les rendements « fonte / charbon de bois », « fer / charbon de bois » apportent finalement peu d'éléments sur les rendements de la carbonisation en meule. A ce jour, seules 9 références sont directement associées au contexte du Périgord Limousin. Nous avons donc dû élargir notre corpus documentaire, orientant nos recherches sur des travaux traitant principalement de la production de charbon de bois. Textes du XVIIIe siècle (Duhamel du Monceau, 1774), recherches ethnographiques (Larcher, 1986 ; Schlosser, 2004) ou encore des expérimentations récentes réalisées dans le cadre associatif (« les charbouniers » de Quincy par exemple) ou dans le cadre scientifique (Paradis-Grenouillet et al., 2009a, 2009b) ont fait l'objet de notre attention.

Dans le contexte du Périgord Limousin, ce sont les résultats de l'enquête réalisée en 1808 par Texier Olivier, les travaux de Peyronnet (1958), de Lamy (1987), de Magne (2004) qui ont apporté l'essentiel de l'information. On y trouve des ordres de grandeur des rendements mais également de nombreuses informations concernant le choix des essences de bois. En effet, on constate que chaque essence de bois n'est pas employée de façon similaire pour les activités métallurgiques. « *On emploie de préférence le chêne et le hêtre pour réduire le minerai en fonte, à défaut on se sert du châtaignier. Le châtaignier et les autres bois plus légers sont préférés pour le travail des affineries, lequel nécessite pour obtenir du fer forgé de bonne qualité un combustible moins abondant en carbone et produisant un fer plus doux.* » (Mémoire du maître de forge de Chauffaille, 1789, cité dans Peyronnet, 1958, p. 252). Le charbon de châtaignier est toujours séparé des autres essences, non seulement pour ses qualités techniques mais également en raison d'une différence de masse à l'issue de la carbonisation : « *une brasse de châtaignier donne entre 185 et 205 kg de charbon, celle de chêne entre 230 et 250 kg* » (Magne, 2005, p. 30). Même si les rendements sont différents selon les essences employées, il ne s'agissait pas dans le cadre de cette étude d'établir des rendements pour chacune des essences mais d'obtenir une estimation moyenne de rendement pour l'ensemble des bois.

Nous avons donc procédé de la même façon que pour établir les ratios « fonte / charbon de bois », « fer / charbon de bois », en recensant l'ensemble des citations non seulement dans des ouvrages centrés sur le Périgord Limousin mais également dans des travaux nationaux (). Prenons ici deux exemples. Le premier est issu de l'enquête Texier-Olivier (1808), « *Les forges [de la Haute Vienne] dans leur état actuel consomment 271 150 myriagrammes de charbon, dont les deux tiers sont composés de châtaignier, et le surplus de chêne et de hêtre. Ce charbon est le résultat de 18 075 stères de bois de la première essence et de 8 220 de la seconde ; ainsi les forges emploient au total 26 295 stères de bois qui proviennent des communes voisines des établissements* » (Texier-Olivier, 1808, p. 407). Le second exemple est plus technique sur les rendements d'une charbonnière. Il s'agit de la description précise du métier de charbonnier rédigé par Duhamel du Monceau, dans l'ouvrage collectif « description des arts et métiers » ; dans la partie « l'art du charbonnier » à la page 672 « Quatre cordes de bois produisent communément une banne de charbon. La banne contient 14, 15 ou 16 poinçons, jauge d'Orléans, de 240 pintes, mesure de Paris. Le grand sac de charbon pèse environ 125 livres, la verse de charbon contient environ 35 livres et la banne 2 500 livres. » (Duhamel du Monceau, 1774) (figure 12).

Les mentions de rendement provenant de documents datant du XVIIIe et du XIXe siècle sont finalement peu nombreuses, nous avons donc ajouté quelques données issues d'observation ethnographique (Larcher, 1986 ; Schlosser, 2004) ou d'expérimentations pour affiner le ratio « quantité de charbon / volume de bois » (figure 12). Les ouvrages ethnographiques décrivent les modes de carbonisation, le mode de vie des charbonniers mais le rapport « charbon de bois / bois » est finalement assez rare et il est souvent exprimé en masse de bois et en masse de charbon, ce qui ne permet pas d'établir un ratio «volume de charbon de bois / masse de charbon de bois».

En recensant l'ensemble des rendements mentionnés dans les textes ainsi que ceux obtenus lors de carbonisations actuelles, nous avons pu calculer le volume de bois nécessaire pour obtenir une tonne de charbon de bois (figure 12 C). Les rendements obtenus pour le chêne, le hêtre, le charme et le châtaignier ont ainsi été moyennés, mais pour prendre en compte la diversité des rendements liés à l'essence, à la fertilité de la parcelle mais également en fonction du savoir faire du charbonnier, nous avons également calculé l'intervalle de confiance associé à cette valeur moyenne. A ce jour nous comptons une vingtaine de données, permettant de proposer un rendement moyen compris entre 12 et 17 m^3 de bois pour produire une tonne de charbon de bois.

A Données retrouvées dans les textes, les documents de synthèse et les approches expérimentales

	SOURCES	BOIS		= CHARBON	
Texte original traitant de la statistique de la Haute Vienne	Texier-Olivier, 1808 p 205	26,295	stère	271,15	myrigrammes
	Texier-Olivier, 1808 p 206	1	stère	100	kilogrammes
Documents de synthèse portant sur le Périgord	Peyronnet, 1958 p 184	1	stère	110	kilogrammes
	Peyronnet , 1958 p 189	26295	stères	27115	quintaux métriques
	lamy, 1987 p224	2774	brasses[1]	6891	bannes
	lamy, 1987 p 224	1	brasse[1]	240	kilogrammes
	lamy, 1987 p 224	1	brasse[1]	195	kilogrammes
	lamy, 1987 p 225	1	brasse[1]	900	livres
	Magne, 2004	1	brasse[1]	200	kilogrammes
	Magne, 2004	1	brasse[1]	240	kilogrammes
Texte du XVIIIe siècle	Duhamel du Monceau, 1771, p 672	4	cordes[2]	1	banne
	Duhamel du Monceau, 1771, p 672	36	cordes[2]	9	bannes
Articles de synthèse sur d'autres régions françaises	Dornic, 1984, p 12	10000	cordes[3]	32500	sacs[4]
	Belhoste, 1990	1	stère	50	kilogrammes
	Charnoz, 2003, p 6	1	stère	71	kilogrammes
	Charnoz, 2003, p 61	17773	stères	950	tonnes
	Charnoz, 2003, p 62	1679	cordes[3]	303	tonnes
Approches expérimentales dans le cadre scientifique ou associatif	FAO, 1984	1	stère	120	kilogrammes
	Schlosser, 2004	30	stères	2,5	tonnes
	Association les charbouniers de Quincy	12	m3	600	kilogrammes
	Expérimentation de Pouligny	6	m3	400	kilogrammes

(1) 1 brasse = 4 m^3 (2)1 corde = 2,7 m^3 (3)1 corde = 3 m^3 (4) 1 sac = 50 kg

Quantité de bois pour produire du charbon de bois

B Données converties dans le système de mesure actuel

SOURCES	BOIS (m^3)	= CHARBON (t)	RATIO (m^3)
Texier-Olivier, 1808 p 205	26,295	2,7115	9,70
Texier-Olivier, 1808 p 206	1	0,1	10,00
Peyronnet, 1958 p 184	1	0,11	9,09
Peyronnet , 1958 p 189	26295	2711,5	9,70
lamy, 1987 p224	11096	448,6041	24,73
lamy, 1987 p 224	4	0,24	16,67
lamy, 1987 p 224	4	0,195	20,51
lamy, 1987 p 225	4	0,4401	9,09
Magne, 2004	4	0,2	20,00
Magne, 2004	4	0,24	16,67
Duhamel du Monceau, 1771, p 672	10,8	1,22375	8,83
Duhamel du Monceau, 1771, p 672	97,2	11,01375	8,83
Dornic, 1984, p 12	30000	1625	18,46
Belhoste, 1990	1	0,05	20,00
Charnoz, 2003, p 6	1	0,071	14,08
Charnoz, 2003, p 61	17772,5	950	18,71
Charnoz, 2003, p 62	5037	303	16,62
FAO, 1984	1	0,12	8,33
Schlosser, 2004	30	2,5	12,00
Association les charbouniers de Quincy	12	0,6	20,00
Expérimentation de Pouligny	6	0,4	15,00

Ratio établi permettant de connaître le volume de bois nécessaire pour produire une tonne de charbon de bois

Statistiques descriptives

Valeur moyenne	14,6 m^3
Valeur maximale	24,7 m^3
Valeur minimale	8,3m^3
Nombre de données	21
Ecart type	5,1 m^3
Intervalle minimal	12,4 m^3
Intervalle maximal	16,8 m^3
Marge d'erreur	2,2 m^3
Pourcentage d'erreur	15,1 %

Pour produire une tonne de charbon de bois il faudrait entre 12,4 et 16,8 m^3 de bois

Figure 12 : Recensement et conversions des données de rendement « volume de bois / quantité de charbon » pour établir le rendement moyen des charbonnières.

2.3.4. Du volume de bois aux surfaces de forêts

Il s'agit maintenant de convertir les volumes de bois en surfaces forestières consommées. Nous proposons ici d'établir un rendement moyen des « forêts métallurgiques » du Périgord Limousin. S'il était déjà délicat d'obtenir des informations sur les rendements de la carbonisation des bois en meule pour le XVIIIe et le XIXe siècle sur le territoire du Périgord Limousin, les données traitant des rendements des différents peuplements sylvicoles sont encore plus rares (seulement trois données sur l'ensemble des documents étudiés). Texier-Olivier et E. Peyronnet font parfois référence à l'essence de bois employée ainsi qu'à l'âge d'abattage des arbres, ces informations sont primordiales pour évaluer les types de peuplement exploités par les métallurgistes.

Prenons l'exemple, particulièrement bien détaillé, de la lettre rédigée par François Delpouge, ancien fournisseur de canons du roi, le 7 février 1774. « *Les essences du bois les plus communes dont on fait le charbon sont de chêne et de châtaignier. Il n'y a pas d'autre bois. Elles sont assez considérables pour entretenir les forges voisines quoiqu'en nombre ; les forests nommées telles y sont rares ; il n'y en a que deux : - celle de Marton, en Angoumois, à 3 lieues de France de la dite forge, laquelle forest peut donner mille brasses par an et le bois de l'âge de 15 ans. Elle est plus près d'autres forges dont nous parlerons cy-après ; - et celle de la Rochebeaucourt, même province ; cette dernière est à peu près à même distance et ne donne qu'environ 600 brasses par an, bois de 15 ans aussi. Mais la dite forge de Jomelière trouvera toujours facilement son entretien à demy-lieue, trois quarts de lieu, une lieue et, un peu plus loin, à 2 lieues de droite et fauche, tant distribués en petites parties qu'en parties. De conséquence, comme mille brasses de l'un, 500 de l'autre, 400, 200, 100 et guère en sous, il y en a sur toutes sortes de terrains, sauf les marais. On coupe ordinairement le bois à 15 ans, c'est à dire les personnes les plus aisées, car d'autres le coupent à 12 et d'autres à 10.* » (Delapouge, 1774, cité dans Peyronnet, 1958 p 89).

La description faite par Duhamel du Monceau dans « l'art du charbonnier » permet également d'obtenir une image relativement fidèle des types de bois employés pour la production de charbon de bois. « Comme il faut que l'action du feu pénètre jusqu'au centre des morceaux de bois qu'on cuit en charbon, il y aurait de l'inconvénient à employer pour cet usage de trop gros bois, la superficie en serait consumée avant que le centre des bûches

fût réduit en charbon. Quand il arrive donc que les bûches soient trop grosses, on les fend, et on les réduit en cotrets […]. D'ailleurs, le plus gros bois à brûler étant plus cher que le menu, on trouve plus de profit à n'employer que ce dernier pour faire du charbon. […] Voilà bien des raisons pour destiner à faire du charbon les taillis de 18 à 20 ans, qui fournissent des rondins de 6 à 12 pouces de circonférence, plutôt que des branchages qui ayant presque toujours le défaut d'être tordus, occasionnent des vides dans l'intérieur du fourneau qui empêchent les charbonniers de bien conduire le feu. » (Duhamel du Monceau, 1774).La circonférence ici proposée de 6 à 12 pouces correspond à des bois ayant des diamètres compris en 5 et 10 cm, il s'agit de bois de petits à moyens diamètres.

Si ces témoignages ne permettent pas d'évaluer le rendement des peuplements sylvicoles, ils permettent en revanche d'identifier les types de peuplements employés par les charbonniers. Connaître le type de peuplement, les essences, ainsi que l'âge moyen d'abattage des bois exploités pour la métallurgie est primordial pour établir un rendement moyen des « forêts métallurgiques ». En effet, l'essence et l'âge des bois influence fortement les volumes de bois obtenus : un taillis de chêne ne produira pas le même volume de bois à 10, 20 ou encore 40 ans ; pour les mêmes âges un taillis de châtaignier aura des rendements généralement supérieurs.

Le recensement des mentions de bois révèle des « forêts métallurgiques », en Périgord Limousin, principalement composées de chêne et de châtaignier ; le hêtre et le charme sont évoqués mais de façons plus épisodiques. Ces bois, gérés en taillis, étaient généralement coupés tous les 15 à 20 ans « pour les personnes les plus aisées » (Delapouge, 1774, cité dans Peyronnet, 1958 p 89). Mais on trouve également des mentions de coupes à très courtes révolutions ; par exemple en Limousin « la majeur partie des taillis se coupe tous les 6, 7, 8 ou 9 ans au plus et on peut se faire aisément une idée de la grosseur du bois et du charbon qui en provient. » (Subdélègué de Saint Yrieix, 1788, Peyronnet, 1958, p. 145).
Pourtant, des coupes à si courtes révolutions étaient interdites en France dès le XVIe siècle. En effet, en 1563, les coupes des taillis sont réglementées et ne doivent pas être effectuées sur des peuplements âgés de moins de 10 ans (Georlette, 1957a ; Devèze, 1961). En 1563, Michel de L'Hôpital, ministre durant le règne de Charles IX, publia un édit allant en ce sens : « qui interdisait la coupe des taillis âgés de moins de 10 ans et qui enjoignait aux communautés ecclésiastiques de laisser croître en haute futaie la tierce partie au moins de leurs forêts » (Georlette, 1957a, p. 119).

Il semblerait que certains secteurs du Périgord Limousin n'aient pas suivi les prérogatives royales quant à l'exploitation des forêts pour produire plus de fer. Même si la majorité des mentions de gestions sylvicoles évoque de si courtes révolutions, on trouve en revanche quelques citations témoignant d'une gestion plus raisonnée, proche des recommandations des autorités et des données de Duhamel du Monceau. « [...] Les propriétaires des bois-taillis de chêne font couper ce bois qui est propre à faire du charbon à l'âge d'au moins quatorze ans, à moins que ces propriétaires ne soient subordonnés par quelques circonstances comme l'aisance, le besoin et la force majeur ; qu'enfin il est bien reconnu que plus l'on retarde ses coupes jusqu'à l'âge de dix-huit ans, plus il en résulte de grands avantages pour le possesseur, ce qui est parfaitement observé par ceux qui jouissent d'une certaine aisance. » (Arch 16 2E11415 citée par Magne, 2005).

Parmi l'ensemble des données recensées dans l'ouvrage de Peyronnet, seule une mention nous permet de calculer le rendement d'un taillis exploité en Périgord. C'est une fois encore le mémoire de François Delapouge qui nous apporte cette information. « Un arpent de ce pays en Périgord contient 900 brasses carrées de 6 pieds et demy chacune ou 5,850 pieds carrés, et fournit environ 14 à 15 brasses par journal ou arpent tous les 15 ans et moins, s'il est coupé plus jeune. Le châtaignier profite plus et donne plus d'un sixième que le chêne. Il y a du terrain meilleur qui donneroit de 18 à 20 brasses, tant que l'autre ne donneroit que 14 et 15 » (Delapouge, 1774 cité dans Peyronnet, 1958, p. 89). Une fois retranscrit dans le système métrique on obtient entre 160 et 200 m^3 de bois pour un hectare de taillis.

Si l'on compare ces données aux rendements établis par Duhamel du Monceau dans « De l'exploitation des arbres » (Duhamel Du Monceau, 1764), on constate que les rendements proposés par Delapouge sont nettement supérieurs. En effet, Duhamel du Monceau calcule de façon très théorique les rendements de différents taillis pour évaluer l'âge optimal de coupe. Il évalue ainsi le rendement de brins de chêne âgés de 20, 25 et 30 ans, ces derniers présentant donc des tailles différentes. En calculant le nombre de brins pour un arpent, il évalue les rendements de ces types de peuplement. Si l'on prend l'estimation faite sur des taillis de 20 ans, âge se rapprochant le plus des « forêts métallurgiques » exploitées en Périgord Limousin, voici les quantités de bois produites par un arpent de taillis : « *Neuf cents brins [cela correspond à 1 arpent] de taillis de 20 ans de 10 pouces de grosseur sur 20 pieds*

de hauteur, produisent environ huit cordes de bois. [...] Il résulte qu'un arpent de taillis de 20 ans, qui produirait 8 cordes de bois … » (Duhamel Du Monceau, 1764 p 174). Avec une corde ici évaluée à 3,8 m^3, le rendement est de 72 m^3/ha. Pour des peuplements de 25 et 30 ans les rendements s'élèvent respectivement à 109 et 162 m^3 à l'hectare.

Il est difficile d'expliquer ces écarts de production entre les données obtenues à partir des textes de Delapouge de Duhamel du Monceau. En effet, les essences ne sont pas les mêmes, on ne connaît pas la fertilité de la placette. Cela met tout de même en évidence la diversité des productions que l'on peut rencontrer dans la littérature.

A travers les différents travaux réalisés à l'échelle de la France (Belhoste, 1990 ; Woronoff, 1990 ; Boissière, 1990 ; Benoit, 1990) on retrouve une utilisation dans la plupart des contextes de taillis à courtes voire très courtes révolutions, comprises le plus généralement entre 10 et 20 ans. Afin d'évaluer les surfaces de taillis exploitées par les métallurgistes il est important d'établir un rendement moyen des taillis gérés à courte révolution. Or, établir un rendement moyen de taillis est encore délicat. « *L'estimation exacte du volume voire de la biomasse des taillis sur pied n'est pas facile et à vrai dire, la faible valeur de ces peuplements n'a guère tenté l'esprit de recherche* » (Vallet et al., 2007).

Nous avons réuni l'ensemble des mentions faisant référence à des rendements de taillis. Retrouvant peu de données dans les travaux portant sur le Périgord Limousin, nous avons ajouté des rendements proposés par des auteurs traitant de la question du combustible pour la métallurgie sur l'ensemble de la France (Bechmann, 1984 ; Belhoste, 1990 ; Woronoff, 1990 ; Charnoz, 2003), ceux obtenus par des scientifiques du XVIIIe siècle (Duhamel du Monceau, 1774), ainsi que des ratios établis dans le cadre de recherches récentes sur les potentiels forestiers (Pardé et Bouchon, 1988 ; Bary-Lenger et Nebout, 1993 ; Bourgeois, 2004) (figure 14).

Enfin pour compléter cette recherche, nous avons également pris en compte quelques données de rendements proposées par d'autres auteurs travaillant sur la question des « forêts métallurgiques » pour les Temps Modernes et l'Epoque Contemporaine (Belhoste, 1990 ; Woronoff, 1990) ainsi que des données établies par des forestiers. En effet, les données contemporaines sont un peu plus fournies. L'étude sur le chêne conduite par Bary-Lenger

et Nebout (1993) propose une évaluation des rendements en fonction de la fertilité de la placette. « *On estimait qu'à 25 ans, la production moyenne de bois [de chêne] de mines (circonférence minimum des perches : 12 cm) était de 45 m³ dans un taillis médiocre, de 70* m³ *dans un taillis moyen et de 90* m³ *dans un très bon taillis* » (Bary-Lenger et Nebout, 1993 p. 371). Cela donne ainsi un bon aperçu de la variabilité des rendements (figure 14).

Le même genre d'étude a été réalisé sur le châtaignier : « Le châtaignier, un arbre, un bois » (Bourgeois, 2004). Dans cet ouvrage, les rendements sont détaillés en fonction de la fertilité de la placette, de l'âge des bois. Pour cette étude, seules les productions des placettes à fertilité moyenne ont été employées. .

En 2007, le Cemagref propose une étude détaillée sur les rendements des taillis selon les régions françaises. On voit ainsi une large gamme de rendements non seulement en fonction de l'âge des bois mais également en fonction de l'essence. En effet, le châtaignier est systématiquement séparé des autres feuillus car son rendement est nettement supérieur (Vallet et al., 2007) (figure 13). A partir de ces graphiques nous avons évalué un rendement moyen pour différents âges qui ont pu être reportés par la suite dans notre tableau de synthèse (figure 14).

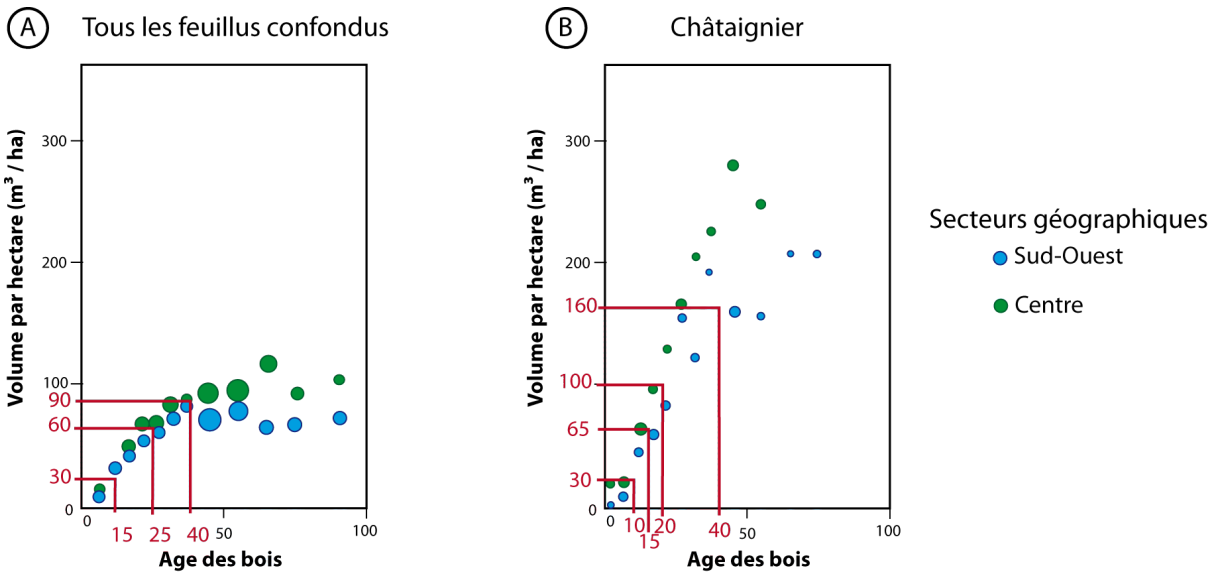


Figure 13 : Graphique représentant l'évolution des rendements des taillis de feuillus en fonction de l'âge. Le châtaignier a été séparé des autres feuillus en raison des rendements nettement supérieurs (d'après Vallet *et al.*, 2007)

A ce jour, trente quatre mentions de rendements de taillis ont été enregistrées mais finalement peu sont directement associées au contexte du Périgord Limousin. Lors de la saisie de ces informations, l'ensemble des rendements de taillis rencontrés a été enregistré, les âges d'abattage sont ainsi compris entre dix et trente ans (figure 14).

	Surface	Volume bois	Commentaires	Sources
Textes portant sur le Périgord Limousin	10000 mètre carré	50 brasses [3]	taillis indifférencié	Magne, 2004
	10000 mètre carré	40 brasses [3]	taillis indifférencié	Magne, 2004
	1 arpent [1]	15 brasses [3]	taillis indifférencié	Peyronnet, 1958
Texte du XVIIIe siècle	1 arpent [2]	8 cordes [4]	taillis indifférencié 20 ans	Duhamel du Monceau, 1764
	1 arpent [2]	12 cordes [4]	taillis indifférencié 25 ans	Duhamel du Monceau, 1764
	1 arpent [2]	18 cordes [4]	taillis indifférencié 30 ans	Duhamel du Monceau,1764
Auteurs travaillant sur la métallurgie en France	1 hectare	84 métre cube	taillis indifférencié 16 ans	Bekman, 1984
	150 arpents [1]	11000 cordes [5]	taillis indifférencié 24 ans	Belhoste, 1990
	125 arpents [1]	7800 cordes [5]	taillis indifférencié 28 ans	Belhoste, 1990
	200 hectares	6000 cordes [5]	taillis indifférencié 10 ans	Belhoste, 1990
	1 arpent [1]	36 cordes [5]	tailis indifférencié 20 ans	Belhoste, 1990
	1 arpent [1]	40 cordes [5]	tailis indifférencié 25 ans	Belhoste, 1990
	100 arpents [1]	7000 cordes [5]	taillis indifférencié 24 ans	Belhoste, 1990
	1 arpent [1]	48 cordes [5]	taillis indifférencié20 ans	Belhoste, 1990
	10000 métre carré	60 cordes [6]	taillis indifférencié 18 ans	Woronoff, 1990
	10000 métre carré	80 cordes [6]	taillis indifférencié 22 ans	Woronoff, 1990
	10000 métre carré	90 cordes [6]	taillis indifférencié 25 ans	Woronoff, 1990
Etudes actuelles sur les rendements des taillis	1 hectare	150 métre cube	taillis châtaignier 20 ans	Bourgeois, 2004
	1 hectare	80 métre cube	taillis châtaignier 10 ans	Bourgeois, 2004
	1 hectare	45 métre cube	taillis chêne 25 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
	1 hectare	70 métre cube	taillis chêne 25 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
	1 hectare	90 métre cube	taillis chêne 25 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
	1 hectare	46 métre cube	taillis chêne 10 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
	1 hectare	82 métre cube	taillis chêne 15 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
	1 hectare	118 métre cube	taillis chêne 20 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
	1 hectare	158 métre cube	taillis chêne 25 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
	1 hectare	30 métre cube	taillis feuillus 15 ans	Cemagref, 2007
	1 hectare	60 métre cube	taillis feuillus 25 ans	Cemagref, 2007
	1 hectare	90 métre cube	taillis feuillus 30 ans	Cemagref, 2007
	1 hectare	30 métre cube	taillis châtaignier 10 ans	Cemagref, 2007
	1 hectare	65 métre cube	taillis châtaignier 15 ans	Cemagref, 2007
	1 hectare	100 métre cube	taillis châtaignier 20 ans	Cemagref, 2007
	1 hectare	130 métre cube	taillis châtaignier 25 ans	Cemagref, 2007
	1 hectare	160 métre cube	taillis châtaignier 40 ans	Cemagref, 2007

Valeurs de l'arpent
(1) 4000 m^2 (2) 4221 m^2

Valeurs de la corde et de la brasse
(3) 4,5 m^3 (4) 3,8 m^3 (5) 1 m^3 (6) 2,5 m^3

Figure 14 : Mentions de rendements de taillis d'âges et d'essences différents

Or, pour établir un rendement moyen des « forêts métallurgiques » du Périgord Limousin aux XVIIIe et XIXe siècles, il est important de prendre en considération l'âge relativement jeune des bois abattus. Nous l'avons vu précédemment, les témoignages révèlent une utilisation de bois de taillis âgés de moins de vingt ans. C'est pourquoi pour le calcul du rendement moyen nous avons uniquement conservé les rendements des taillis âgés de vingt ans et moins. Ainsi sur les quinze données restantes on obtient un rendement moyen de 83 +/- 20 m^3/ha (figure 15).

La mise en place de ratios permettant d'une part d'évaluer la consommation en charbon de bois par les établissements sidérurgiques et d'autre part d'évaluer les rendements des « forêts métallurgiques » et de charbonnières autorise une évaluation de l'étendue des surfaces forestières consommées par les forges. Il est bien évidemment nécessaire d'être particulièrement vigilant lors des conversions des données de production, et de prendre en considération les marges d'erreur établit pour chaque ratio pour obtenir une estimation de la consommation des forges la plus précise possible.

Pour évaluer l'emprise des activités métallurgiques sur le couvert forestier, la seule estimation des surfaces forestières consommée n'est pas suffisante, il reste à connaître le potentiel forestier sur le territoire à l'époque du fonctionnement des établissements sidérurgiques.

(A) Données portant uniquement sur des taillis âgés de moins de 20 ans

Surface		Volume bois		Commentaires	Sources
1	arpent [1]	8	cordes [4]	taillis indifférencié 20 ans	Duhamel du Monceau, 1764
1	hectare	84	métre cube	taillis indifférencié 16 ans	Bekman, 1984
200	hectares	6000	cordes [5]	taillis indifférencié 10 ans	Belhoste, 1990
1	arpent [2]	36	cordes [5]	tailis indifférencié 20 ans	Belhoste, 1990
1	arpent [2]	48	cordes [5]	taillis indifférencié 20 ans	Belhoste, 1990
10000	métre carré	60	cordes [6]	taillis indifférencié 18 ans	Woronoff, 1990
1	hectare	150	métre cube	taillis châtaignier 20 ans	Bourgeois, 2004
1	hectare	80	métre cube	taillis châtaignier 10 ans	Bourgeois, 2004
1	hectare	46	métre cube	taillis chêne 10 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
1	hectare	82	métre cube	taillis chêne 15 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
1	hectare	118	métre cube	taillis chêne 20 ans	Bary-Lenger et Nebout, 1993
1	hectare	30	métre cube	taillis feuillus 15 ans	Cemagref, 2007
1	hectare	30	métre cube	taillis châtaignier 10 ans	Cemagref, 2007
1	hectare	65	métre cube	taillis châtaignier 15 ans	Cemagref, 2007
1	hectare	100	métre cube	taillis châtaignier 20 ans	Cemagref, 2007

Valeurs de l'arpent

[1] 4000 m² [2] 4221 m²

Valeurs de la corde et de la brasse

[4] 3,8 m³ [5] 1 m³ [6] 2,5 m³

(B) Données converties dans le système métrique

Sources	Surface (ha)	Volume bois (m^3)	RATIO (m^3/ha)
Duhamel du Monceau, 1771	0,4221	30,4	72
Bekman, 1984	1	84	84
Belhoste, 1990	200	6000	30
Belhoste, 1990	0,4	36	90
Belhoste, 1990	0,4	48	120
Woronoff, 1990	1	150	150
Bourgeois, 2004	1	150	150
Bourgeois, 2004	1	80	80
Bary-Lenger et Nebout, 1993	1	46	46
Bary-Lenger et Nebout, 1993	1	82	82
Bary-Lenger et Nebout, 1993	1	118	118
Cemagref, 2007	1	30	30
Cemagref, 2007	1	30	30
Cemagref, 2007	1	65	65
Cemagref, 2007	1	100	100

Ratio établi permettant de connaître le volume de bois obtenus sur un hectare de taillis

(C) Mise en place d'un ratio permettant d'évaluer le rendement d'un taillis moyen

Statistiques descriptives

Valeur moyenne	83,1
Valeur maximale	150,0
Valeur minimale	30,0
Nombre de données	15,0
Ecart type	39,8
Intervalle de confiance 1	62,6
Intervalle de confiance 2	103,7
Marge d'erreur	20,5
Pourcentage d'erreur	24,7

Le rendement moyen de taillis âgés de 10 à 20 ans est donc compris entre 63 et 104 m³/ha

Figure 15 : Mise en place d'un ratio permettant d'évaluer le rendement moyen des taillis âgés de moins de 20 ans.

3. Evaluer les ressources forestières sur les communes proches des établissements sidérurgiques à partir des documents cartographiques

Retrouver les surfaces forestières des XVIIIe et XIXe siècles nécessite une fois encore un important travail d'étude des documents historiques. Enquêtes statistiques, documents iconographiques, cartes, plans, documents cadastraux sont autant de documents nous permettant d'approcher d'une image plus ou moins satisfaisante des forêts du passé. Dans le cadre de cette étude, c'est une évaluation des surfaces forestières que l'on doit obtenir.

3.1. Retrouver les surfaces forestières à partir des enquêtes statistiques

Evaluer les surfaces forestières à partir des enquêtes statistiques organisées par les autorités n'est pas si évident. En effet, les forêts privées ont malheureusement fait l'objet de peu d'enquêtes statistiques systématiques contrairement aux forêts domaniales. Les forêts du Périgord Limousin étant pour l'essentiel des petites forêts privées, ces espaces sont méconnus à la lecture des documents historiques. On retrouve, disséminés dans les textes, des témoignages du mauvais état des forêts, mais rares sont des études présentant des résultats détaillés du potentiel forestier. L'enquête de Texier-Olivier de 1808 dresse un état des lieux particulièrement sombre des forêts de la Haute Vienne. « *En jetant les yeux sur l'état des forêts, on ne peut se défendre d'un sentiment d'effroi pour l'avenir ; la génération actuelle a dévoré les ressources des générations futures ; presque tous les bois sont dégénérés ou détruits. On ne trouve nulle part ces antiques forêts [...] qui firent regarder le Limousin comme un des pays les mieux boisés de France. Le désordre commença longtemps avant la Révolution. Le système mal conçu des défrichements fut la première cause de destruction ; il n'existait déjà plus en 1789 de bois de haute futaie, ni de forêts proprement dites* ». (Texier-Olivier, 1808, p. 51). Bien qu'il soit difficile de définir si cette description est objective ou non, les renseignements sur l'âge moyen de coupe sont très intéressants: « On coupe les forêts à l'âge de 25 à 30 ans ; les plus considérables, surtout celles qui appartiennent au domaine, sont sujettes aux aménagements et divisées en coupes réglées. On n'y connait plus de bois de haute futaie ; ils ont disparu depuis plus de vingt ans »

(Texier-Olivier, 1808, p. 50). A travers cet ouvrage on retrouve également de nombreuses informations concernant les surfaces forestières pour les différentes communes. Ces données sont bien reprises dans l'article de J.P. Delhoume « Forêts et usage du bois en Haute Vienne : un bilan en 1808 » : « L'enquête distingue les châtaigneraies des autres espèces arborées comprenant deux ensembles, les forêts et les taillis. L'étendue de ces différents types de boisement est la suivante :

- *forêts : 9895 ha (1,8 % de la superficie totale du département qui est de 558 078 ha)*
- *les taillis : 29685 ha (5,3 %)*
- *les châtaigneraies : 33 663 ha (6 %)* (Delhoume, 2011, p. 33)

Malheureusement ces données si précises ne concernent que le département comptabilisant le plus petit nombre de forges (moins de 10). Il nous faut donc collecter d'autres documents permettant d'étudier les ressources forestières du Périgord Limousin.
Pour les XVIIIe et XIXe siècles, ce sont les documents cartographiques qui nous apportent la meilleure vision de l'étendue des forêts du Périgord Limousin. Néanmoins, selon les cartes étudiées, l'information obtenue est différente ; toutes ne permettant pas une analyse quantitative précise des surfaces forestières disponibles. Par exemple, si la carte de Cassini est une belle œuvre artistique, elle ne permet pas en revanche d'étudier de façon précise les surfaces forestières existantes. En revanche on connaît quelques cartes plus précises, c'est le cas de la carte de Belleyme (Durrens, 2011).

3.2. La carte de Cassini, les espaces forestiers inégalement représentés

Afin d'évaluer les surfaces forestières des XVIIIe et XIXe siècles sur l'ensemble du territoire nous avons tenté une approche à partir de quelques cartes et plans.

Si avant le XVIIe siècle, les cartes et les plans étaient réalisés dans un but militaire, on voit progressivement ce savoir-faire généralisé à l'ensemble des domaines de la vie politique (Pelletier, 2002). En effet, pour mieux connaître et gérer leur territoire, rapidement les autorités mesurent l'intérêt des documents cartographiques. Répartir les impôts, revoir les tracés routiers, élaborer des stratégies militaires sont autant de raisons pour établir une carte

de l'ensemble du territoire français. Les recherches conduites par l'Académie des Sciences vont, dès le XVIIIe siècle, initier d'importantes campagnes de relevés cartographiques.

La première carte générale de la France a été débutée par César François Cassini de Thury dès 1746, la publication des différentes cartes s'échelonnant jusqu'en 1815, date de publication de la dernière carte. Ce travail avait pour objectif de recenser l'ensemble des toponymes français, d'indiquer les bâtiments importants (édifices religieux, établissements industriels), de représenter l'occupation du sol (prairies, landes, marais, forêts etc.). Mais selon les secteurs et les arpenteurs, les relevés s'avèrent parfois imprécis ; c'est notamment le cas des reliefs et des espaces forestiers qui sont souvent peu réalistes (Pelletier, 2002 ; Durrens, 2011). En effet, les massifs forestiers sont, dans certains secteurs, uniquement représentés par une grosse masse verte, alors que dans d'autres, ils sont au contraire parfaitement dessinés, révélant même les types de peuplement, différenciant ainsi les taillis des futaies.

Ces documents doivent donc être étudiés avec minutie pour en extraire l'information la plus précise possible. Sur la partie sud de notre territoire d'étude, une recherche récente apporte un nouveau regard sur l'histoire du Périgord à travers l'analyse des cartes anciennes : « Le Périgord et les cartes. Les représentations du Périgord à travers les cartes et l'histoire de la cartographie du Périgord » (Durrens, 2011). « Le Périgord, en retrait dans le premier projet de Cassini, devient une des régions pionnières dans le cadre d'un travail pratiquement sans équivalent lorsque la Guyenne peut s'affirmer par rapport aux autres provinces et face au pouvoir central. Ce double projet valorisant pour le Périgord est confié en 1766 à l'ingénieur cartographe Pierre de Belleyme, un périgourdin. » (Durrens, 2011, p. 236). En effet, les cartes réalisées par ce cartographe sont très précises les massifs forestiers sont particulièrement bien représentés allant même jusqu'à différencier les taillis des futaies, ce qui est un élément important pour étudier les forêts disponibles pour la métallurgie.

Malgré la précision de ces cartes, il est difficile d'évaluer l'étendue des massifs forestiers, les limites sont souvent remises en question par les différents auteurs ayant travaillé sur ce type de documents (Pelletier, 2002 ; Durrens, 2011). Depuis quelques années un vaste programme a été initié par D. Vallauri, A. Grel, E. Garnier et J.L Dupouey pour digitaliser l'ensemble des forêts indiquées sur la carte de Cassini. L'ouvrage produit « Les forêt de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles » offre aujourd'hui une

carte des forêts françaises du XVIIIe siècle (Vallauri et al., 2012). Au regard de cette carte il semble manquer bon nombre de massifs forestiers sur le Limousin et la Dordogne, alors que d'autres documents datant de la même époque semblent indiquer beaucoup plus de forêts (Durrens, 2011).La quantification des espaces forestiers à partir de ces cartes nécessite alors de les numériser, de les géoréférencer, afin de calculer les surfaces forestières existantes en utilisant un Système d'Information Géographique. L'inégale répartition de cartes aussi précises que celle de Belleyme ne nous permettant pas d'accéder à une image globale des forêts en Périgord Limousin, nous ne nous sommes pas appuyés sur ces documents.

3.3. Les relevés à l'échelle de la parcelle : le meilleur moyen de calculer le potentiel forestier par commune

Finalement pour quantifier les surfaces forestières du passé rien n'est plus précis que les relevés effectués à l'échelle de la parcelle. Ce type de relevé connu dès le Moyen Age évolue de façon importante au cours des siècles pour apporter une information toujours plus précise.

Au Moyen Age quelques seigneurs, quelques ordres religieux procèdent au recensement de leurs biens, chaque parcelle alors était décrite dans des livres de comptes appelés terriers. Ce type de document a été étudié dans la partie nord du Limousin, (Crouzevialle et Faucher, 2006 ; Glomot et Crouzevialle, 2008 ; Glomot, 2009). Les territoires étudiés se situent en dehors de la zone d'étude, et la période chronologique s'avère être bien antérieure au fonctionnement des hauts fourneaux.

Plus proche du contexte de la métallurgie en Périgord Limousin on retrouve des plans basés sur le même principe que les terriers réalisés par le Collège Royal de Limoges, également appelé Collège des jésuites. Aux livres de comptes décrits précédemment sont associés des plans, permettant de relier à chaque parcelle l'occupation du sol et le nom du propriétaire. Etablis en 1771 et 1789, ces plans représentent chaque parcelle en y indiquant précisément le contenu. Ces documents contiennent de très riches informations pour l'étude de l'histoire de la forêt ; pour chaque parcelle sont indiquées les essences, les types de peuplements et parfois même l'âge d'abattage des bois. Ces cartes permettent d'obtenir une idée très précise des types de paysages existant à la fin du XVIIIe siècle sur quelques secteur déterminés

(Blanchard, 2006 ; Blanchard, et al., 2006 ; Audrerie et al., 2006). Ces plans sont épars et ne portent que sur les propriétés de quelques riches seigneurs ou ordres religieux, ce qui ne permet pas d'obtenir une vision globale des espaces forestiers sur l'ensemble du territoire.

Après 1789 un profond changement s'opère en terme de recensement des biens, propriété par propriété. Ce ne sont plus les riches propriétaires ou les ordres religieux qui procèdent à l'inventaire de leurs propriétés, dès lors l'Etat se charge de cette opération. Des grandes campagnes de relevés des cadastres sont initiées dès 1802 enregistrant ainsi, pour l'ensemble des communes françaises, le détail de l'occupation du sol.

3.4. Le cadastre napoléonien : entre livre de compte et document cartographique

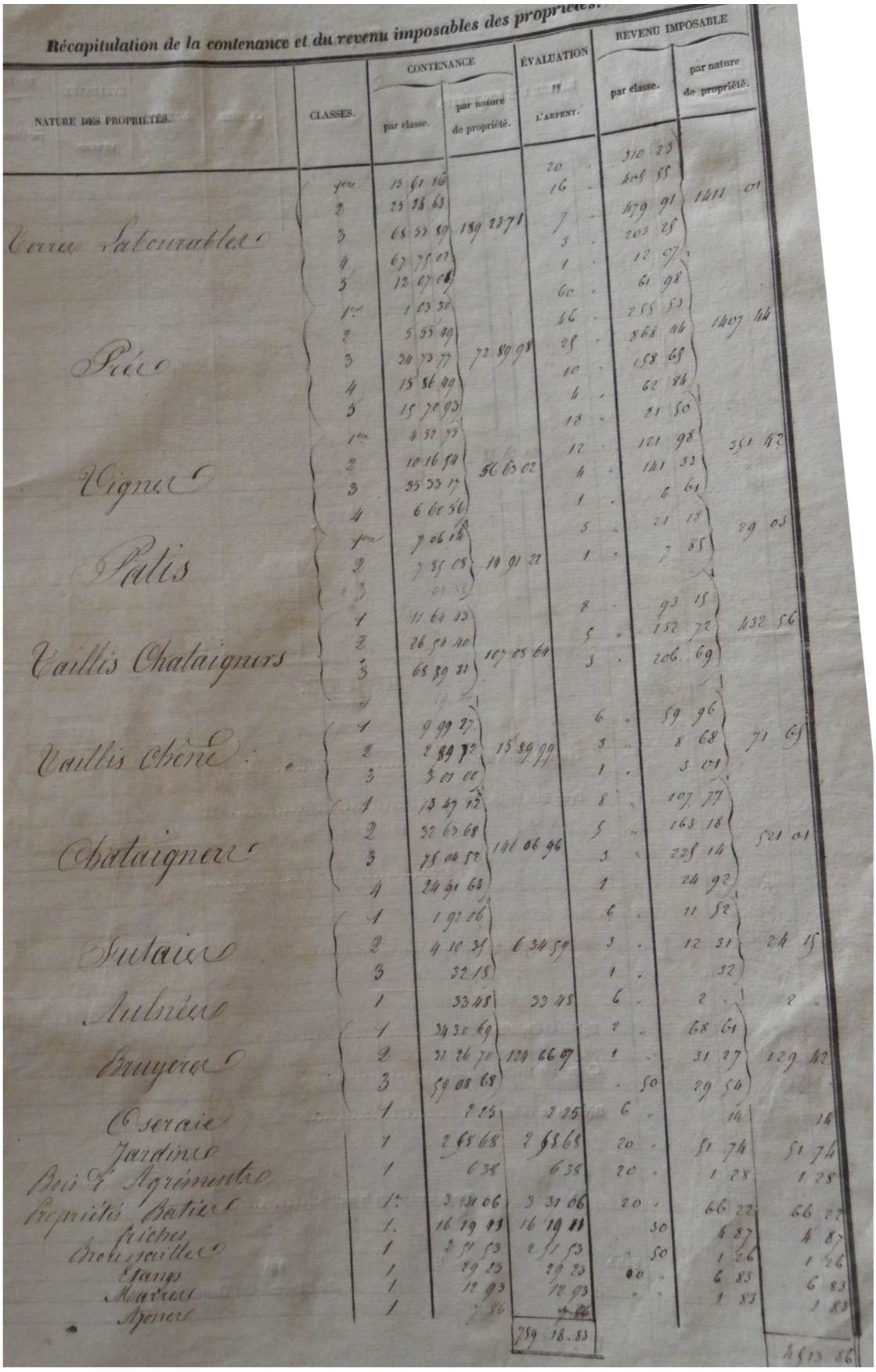
Après les essais peu concluants du cadastre par masse de culture initié en 1802, Napoléon Ier ordonne de réaliser un cadastre très précis à l'échelle de la parcelle. En effet, le précédent cadastre permettait uniquement d'évaluer l'occupation du sol pour l'ensemble d'une commune, les propriétaires devant par la suite se partager le montant total de l'imposition ce qui, bien sûr, posait de nombreux problèmes.

En 1807, Napoléon Ier propose donc un relevé cette fois-ci à l'échelle de la parcelle permettant ainsi de fixer les limites de chaque propriété pour établir un impôt plus juste mais également pour limiter les conflits entre les propriétaires. « *Mesurer sur une étendue de plus de quarante mille lieues carrées, plus de cent millions de parcelles ou de propriétés séparées, confectionner pour chaque commune un plan en feuilles d'atlas où sont reportées ces cent millions de parcelles, les classer toutes d'après le degré de fertilité du sol, évaluer le produit net de chacune d'elles; réunir ensuite sous le nom de chaque propriétaire les parcelles éparses qui lui appartiennent, déterminer par la réunion de leurs produits son revenu total, et faire de ces revenus un allivrement qui sera désormais la base immuable de son imposition.* » (Ministre des fiances, 1811, p. 12). De 1807 à environ 1850, les arpenteurs ont parcouru la France pour établir les cadastres de chaque commune.

Pour chaque commune, les documents cadastraux du début du XIXe siècle se composent de trois documents.

- Les plans parcellaires, généralement découpés en sections, puis en différentes feuilles pour bien représenter l'ensemble des propriétés. Pour simplifier la lecture de ces différents plans, un tableau d'assemblage de l'ensemble de la commune est systématiquement associé.
- Les états de section présentent l'ensemble des parcelles classées. Pour chaque parcelle sont renseignés le contenu, la qualité du sol, la surface, le nom du propriétaire ainsi que le montant de l'imposition. A l'issue des détails par parcelle on retrouve dans un grand nombre de communes une synthèse de l'occupation du sol par section. Ces fiches de « récapitulation » permettent d'obtenir une image très rapide de l'occupation du sol à l'échelle de chaque section sans forcément détailler l'ensemble des parcelles (figure 16).
- Enfin, les matrices cadastrales, rassemblent les noms des propriétaires et indiquent pour chacun d'eux le contenu de leurs propriétés, afin de calculer le montant de l'imposition de chaque propriétaire.

Dans le cadre de cette étude nous nous sommes essentiellement intéressés aux fiches de « récapitulation » réalisé à la fin de chaque section. En effet, ces dernières apportent les informations nécessaires pour calculer les surfaces boisées mais surtout les surfaces gérées en taillis (figure 16).



Récapitulation de la contenance et du revenu imposables des propriétés

NATURE DES PROPRIÉTÉS.	CLASSES.	CONTENANCE par classe.	CONTENANCE par nature de propriété.	ÉVALUATION DE L'ARPENT.	REVENU IMPOSABLE par classe.	REVENU IMPOSABLE par nature de propriété.
Terres labourables	1re	13 61 16		20 »	310 23	
	2	23 38 63		16 »	408 88	1411 01
	3	68 55 89	189 23 71	7 »	479 91	
	4	67 75 03		3 »	203 25	
	5	12 07 00		1 »	12 07	
Prés	1re	1 03 30		60 »	61 98	
	2	5 55 49		46 »	255 53	1407 44
	3	30 73 77	72 89 98	28 »	868 46	
	4	15 86 49		10 »	158 65	
	5	15 70 93		4 »	62 84	
Vignes	1re	4 52 93		18 »	81 50	
	2	10 16 54	56 63 02	12 »	121 98	351 42
	3	35 33 17		4 »	141 33	
	4	6 60 56		1 »	6 61	
Patis	1re	7 06 14		3 »	21 18	29 03
	2	7 85 08	14 91 22	1 »	7 85	
	3	01 00				
Taillis Chataigniers	1	11 64 45		8 »	93 15	
	2	26 54 40	107 05 64	5 »	132 72	432 56
	3	68 89 81		3 »	206 69	
	4					
Taillis Chêne	1	9 99 27		6 »	59 96	
	2	2 89 72	15 89 99	3 »	8 68	71 65
	3	3 01 00		1 »	3 01	
Chataigneraie	1	13 49 12		8 »	107 77	
	2	32 63 68		5 »	163 18	
	3	75 04 52	146 06 96	3 »	225 14	521 01
	4	24 91 64		1 »	24 92	
Futaie	1	1 92 06		6 »	11 52	
	2	4 10 35	6 34 59	3 »	12 31	24 15
	3	32 18		1 »	32	
Aubrée	1	33 48	33 48	6 »	2 »	2 »
Bruyère	1	34 30 69		2 »	68 61	
	2	31 26 70	124 66 07	1 »	31 27	129 42
	3	59 08 68		» 50	29 54	
Oseraie	1	2 25	2 25	6 »	14	14
Jardins	1	2 68 68	2 68 68	20 »	51 74	51 74
Bois d'Agrément	1	6 38	6 38	20 »	1 28	1 28
Propriétés Bâties	1re	3 31 06	3 31 06	20 »	66 22	66 22
Friches	1	16 19 11	16 19 11	» 30	4 87	4 87
Broussailles	1	2 51 53	2 51 53	» 50	1 26	1 26
Etangs	1	29 23	29 23	00 »	6 83	6 83
Marais	1	12 93	12 93	» »	1 83	1 83
Aprés	1	7 86	7 86			
			759 18 83			4513 86

Figure 16 : Exemple d'une fiche de « récapitulation » de la commune de Saint Mesmin

4. L'approvisionnement en bois des forges en Périgord Limousin : l'exemple de Savignac-Lédrier.

Cette forge, attestée au XVIe siècle, située sur l'Auvézère est non seulement la dernière en Périgord Limousin à avoir fonctionné au charbon de bois (jusqu'en 1930) mais elle fait également partie des forges ayant les productions de fonte et de fer les plus importantes.
Le travail réalisé par Y. Lamy sur la forge de Savignac-Ledrier permet d'acquérir bon nombre d'informations sur les productions ainsi que sur l'approvisionnement en bois et cela pour plusieurs années. Ce contexte d'étude privilégié est propice pour évaluer l'impact des prélèvements en bois d'une grosse forge en calculant d'une part les surfaces de taillis consommées et d'autre part en évaluant les ressources en bois disponibles sur les communes mentionnées comme approvisionnant la forge.

4.1. Des productions de fonte et de fer aux surfaces de taillis consommées

En réunissant dans la base de données l'ensemble des productions de fonte et de fer recensés dans les travaux de Y. Lamy, puis en utilisant les différents ratios établis précédemment, nous avons pu évaluer les surfaces de bois nécessaires au fonctionnement de la forge de Savignac-Ledrier, et cela sur neuf années (figure 17)

En effet, parmi l'ensemble des données recueillies, seules 9 années sont entièrement renseignées. Pour les autres années nous n'avions que les productions de fer ou au contraire que celle de fonte. N'ayant pas de moyen pour vérifier s'il s'agissait réellement d'une année où un seul type de production avait été réalisé, ces données ont été écartées.

Sur ces quantités de métal produites, on constate une grande variabilité entre les années ; de 490 tonnes de fonte en 1788, la production chute à 160 et 135 tonnes pour les années 1789 et 1811, puis elle remonte avec une production très importante en 1871 avec 627 tonnes ou encore en 1874 avec une production de 909 tonnes de fonte. Mis à part la chute de 1789 pouvant s'expliquer par la période révolutionnaire, les autres fluctuations sont difficilement interprétables. Sont-elles liées à des variations dans les carnets de commandes,

à des accidents techniques (casse de matériel, dégâts dans le haut fourneau), ou encore à des difficultés d'approvisionnement en matière première et notamment en bois ? Il est à ce jour impossible de répondre à ces interrogations à la lumière des données que nous avons recensées ; pour cela il serait important de réaliser une étude précise du contexte historique ainsi qu'une étude détaillée des livres de compte afin d'évaluer si des augmentations du prix des matières premières peuvent en être la cause.

	Production (tonnes)		Consommation en charbon de bois (tonnes)		Consommation de bois (m3)		Surfaces de bois exploitées (ha)		
Année	Fonte	Fer	Minimale	Maximale	Minimale	Maximale	Minimale	Maximale	Moyenne
1788	490	220	945	1243	11716	20895	106	313	210
1789	160	80	322	425	3391	8239	31	124	77
1811	135	85	300	400	3587	7753	32	116	74
1871	627	118	945	1205	11311	23333	102	350	226
1872	337	81	537	689	6419	13346	58	200	129
1873	777	110	1113	1407	13316	27256	121	409	265
1874	909	241	1483	1911	17740	37007	161	555	358
1875	410	344	1049	1419	12555	27477	114	412	263
1876	562	96	831	1055	9940	20444	90	307	198

Exemple de l'année 1788

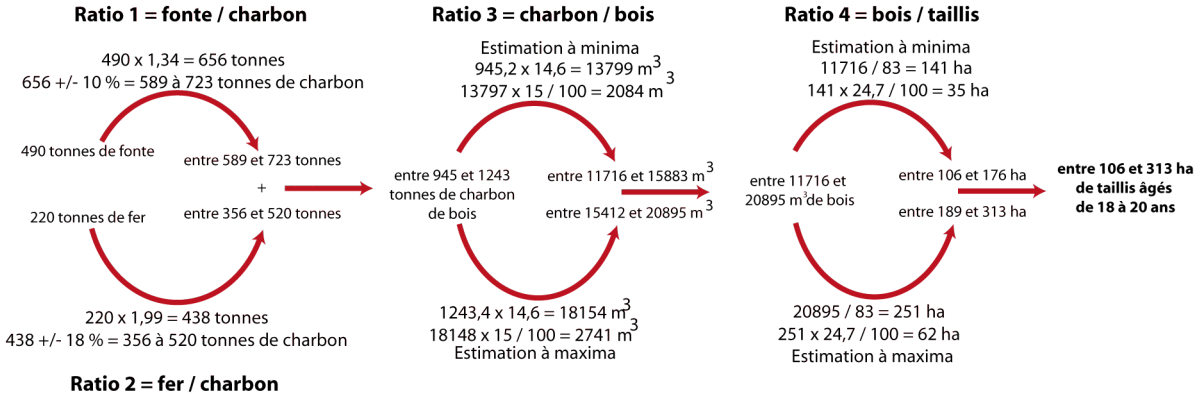


Figure 17 : Données de production de fonte et de fer pour la forge de Savignac-Ledrier pour neuf années, évaluation de la consommation en charbon de bois, en bois et enfin estimation des surfaces de taillis consommées.

4.1.1. De la production de fonte et de fer aux quantités de charbon de bois

Pour chaque année, à partir des productions de fonte et de fer nous avons calculé les quantités de charbon nécessaires, puis les volumes de bois correspondants et enfin les surfaces de taillis exploités pour produire le charbon de bois. Pour cela nous avons employé les différents ratios établis précédemment.

Prenons l'exemple de l'année 1788 (figure 17). Pour cette année, le maître de forge déclare avoir produit 490 tonnes de fonte et 220 tonnes de fer. Nous avons donc dans un premier temps calculé la quantité de charbon employée pour d'une part réduire le minerai puis dans un second temps pour affiner la fonte produite.

D'après le ratio précédemment établi, pour produire une tonne de fonte il fallait en moyenne 1,34 tonne de charbon de bois. Lors de notre analyse nous avons également estimé la marge d'erreur de chaque ratio obtenu ; ici il a été évalué à 10 %. A partir de ces données on peut facilement calculer la quantité moyenne de charbon (656 tonnes) ainsi que la marge d'erreur, ce qui correspond à une quantité de charbon de bois comprise entre 589 et 723 tonnes.

Le même procédé a été appliqué pour les quantités de fer, mais avec le ratio adapté à l'étape d'affinage. Pour produire une tonne de fer il fallait en moyenne 1,99 tonne de charbon de bois prenant en compte également une marge d'erreur de 19 %. Nous obtenons ainsi pour l'année 1788 une quantité de charbon comprise entre 356 et 520 tonnes.

Les quantités de charbon calculées pour les productions de fonte et de fer ont ensuite été associées, tout en conservant les quantités minimales et maximales calculées. On obtient ainsi pour l'année 1788 une quantité de charbon de bois comprise entre 950 et 1250 tonnes.

4.1.2. Du charbon de bois aux surfaces de taillis

A partir de ces données nous avons ensuite estimé les volumes de bois nécessaires pour produire ce charbon de bois, puis les surfaces de taillis nécessaires pour fournir ces quantités de bois (figure 17).

Précédemment nous avons évalué le volume moyen de bois nécessaire pour produire une tonne de charbon de bois à 14,6m^3 avec une marge d'erreur de 15 %. Ainsi si l'on reprend l'exemple de l'année 1788, avec une quantité de charbon comprise entre 945 et 1243 tonnes on peut calculer un volume de bois compris entre 11 716 m^3 et 20 895 m^3.

Enfin à partir du volume de bois nous avons tenté de remonter aux surfaces de forêts consommées gérées en taillis. A partir du rendement « volume de bois / surface de taillis » précédemment établi à 83 m^3 / ha avec une marge d'erreur de 25 %, nous avons pu évaluer les surfaces de taillis minimales et maximales potentiellement exploitées par les métallurgistes. Nous obtenons ainsi des surfaces de taillis comprises entre 107 ha et 316 ha.

Compte tenu des marges d'erreur que nous avons systématiquement ajoutées, les surfaces de taillis minimales et maximales sont très différentes, avec une incertitude de plus de 200 ha. Cela nous permet de proposer trois scénarios :

- un basé sur des estimations à minima,
- un autre sur les valeurs centrales
- et enfin un dernier s'appuyant sur les données maximales.

A partir des neuf années renseignées nous avons pu établir les surfaces minimales et maximales potentiellement exploitées par le maître de forge pour une année de fonctionnement moyenne. Bien que les quantités soient parfois d'une année à l'autre très variables, nous avons choisi de conserver l'ensemble des données ce qui permet d'intégrer à la fois les périodes de faible et de forte production. D'après les calculs basés sur les évaluations moyennes (figure 18) on retrouve les trois scénarios. Celui qui consomme le moins de bois présente une consommation de près de 170 ha, la consommation maximale quant à elle s'élève à plus de 230 ha. Enfin le scénario moyen propose une consommation de 200 ha de taillis âgés de 18 à 20 ans.

	Production (tonnes)	
Année	Fonte	Fer
1788	490	220
1789	160	80
1811	135	85
1871	627	118
1872	337	81
1873	777	110
1874	909	241
1875	410	344
1876	562	96

Surfaces de bois consommées		
Minimale	Maximale	Moyenne
106	313	210
31	124	77
32	116	74
102	350	226
58	200	129
121	409	265
161	555	358
114	412	263
90	307	198

Estimation moyenne des surfaces de taillis consommées

	Minimale	Maximale	Moyenne
Valeur minimale	31	116	**74**
Valeur maximale	161	555	**358**
Valeur moyenne	91	310	**200**
Ecart type	43	144	**93**
Intervalle minimal	76	262	**169**
Intervalle maximal	105	358	**231**

Il faudrait en moyenne entre 169 et 231 ha de taillis pour une année de fonctionnement

Figure 18 : Evaluation des surfaces de taillis consommées pour une année de fonctionnement moyenne.

Mais estimer les surfaces nécessaires pour une année est loin d'être suffisant. En effet, pour que la forge puisse fonctionner chaque année, il faut que les ressources en bois se renouvellent. C'est donc sur une révolution de 19 ans que nous avons réfléchi. On retrouve

les trois scénarios avec une consommation à minima de près de 3200 ha, une moyenne de plus de 3800 ha et une plus pessimiste avec une consommation de près de 4400 ha de taillis. Evaluer la part des prélèvements de cette forge sur l'ensemble des taillis situés à proximité passe nécessairement par une évaluation du potentiel forestier.

4.2. Evaluer les surfaces de taillis du début du XIXe siècle sur les communes approvisionnant la forge de Savignac-Ledrier

Afin de confronter les surfaces nécessaires évaluées à partir des productions de fonte et de fer, il est important d'évaluer les surfaces forestières et plus particulièrement les surfaces de taillis situées à proximité de la forge de Savignac-Ledrier pour le début du XIXe siècle.

4.2.1. Etudier les états de section des communes d'approvisionnement.

Dans le cadre de ses recherches, Y. Lamy a recensé un certain nombre de communes ayant approvisionné la forge de Savignac-Ledrier : « *Pour les six mois de l'année 1872 pour lesquels nous avons essayé de repérer l'origine des approvisionnements, sont concernées les communes suivantes :*

- *Savignac-Ledrier, Saint Messin, Sainte trie, Génis, Lanouille, Payyzac, Beyssenac (aucun achat à Angoisse et Saint-Cyr-les Champagnes) ;*
- *Dans un rayon plus large : Dussac, Glandon, Sarrazac, Lubersac et même Thiviers*
- *Rien vers Excideuil, Anlhiac, Preyssac, Saint Sulpice ou Saint Germain des Prés […]* » (Lamy, 1987 p 226-227) (figure 19).

La localisation de ces communes permet de définir l'aire d'approvisionnement en combustible de la forge de Savignac-Ledrier. La majorité des communes est située à moins de 15 kilomètres de la forge, seules quatre communes sont distantes d'une vingtaine de kilomètre. Ces valeurs correspondent bien aux distances généralement citées dans les sources traitant de métallurgie en Périgord Limousin (Pijassou, 1954 ; Peyronnet, 1958 ; Bouchillou, 1986 ; Lamy, 1987) « L'approvisionnement, de façon générale, se fait dans un rayon d'une quinzaine de kilomètres autour de la forge »(Lamy, 1987 p 227) ; mais également à celles proposées dans des études nationales (Woronoff, 1990 ; Belhoste, 1990 ; Boissière, 1990)

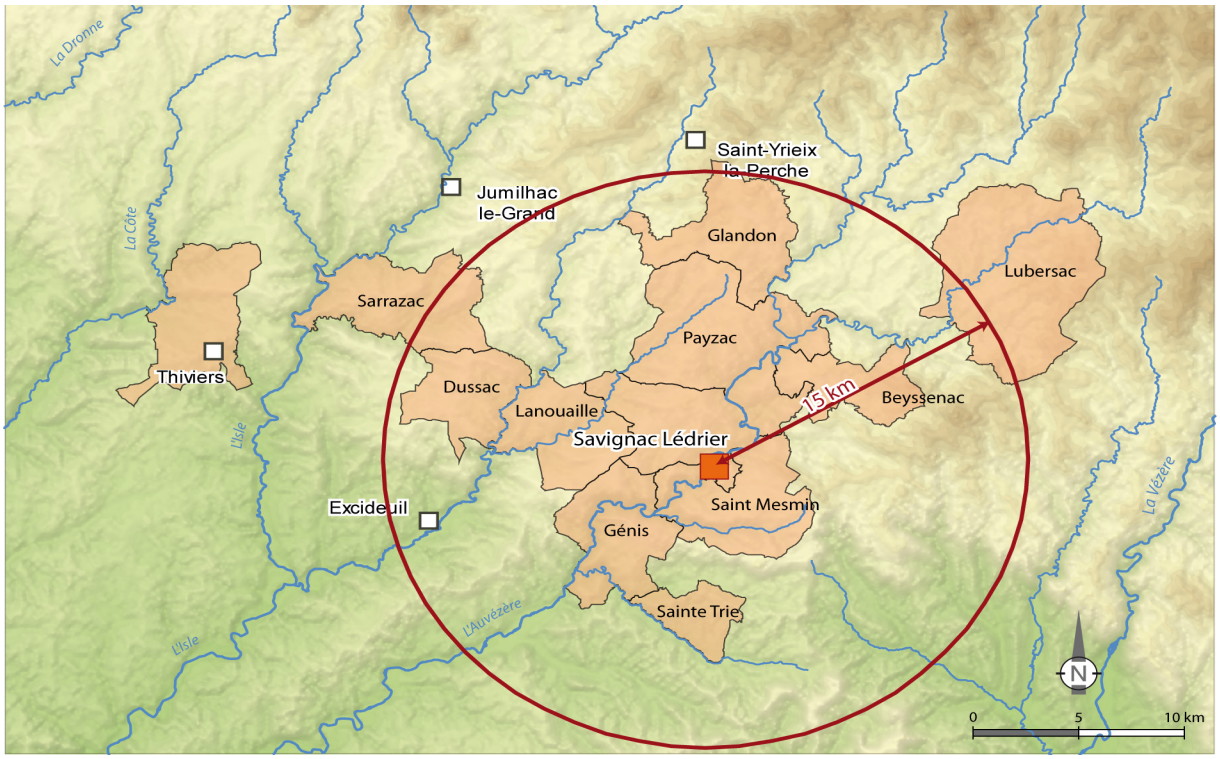


Figure 19 : Carte de localisation des communes approvisionnant la forge de Savignac-Ledrier pour l'année 1872.

L'identification des communes d'approvisionnement en bois est un atout réduisant considérablement le champ de recherches aux archives pour évaluer les surfaces forestières gérées en taillis. Ces douze communes situées dans trois départements ont nécessité des recherches au sein des archives départementales de chacun d'eux. Des différences de retranscription entre les trois départements ont pu être observées ; deux communes de la Corrèze (Lubersac et Beyssenac) n'ont d'ailleurs pas pu faire l'objet d'étude précise, les récapitulatifs ne figurant pas au sein des états de section. En revanche, les états de section consultés en Dordogne se sont révélés particulièrement riches en informations. Les modes de gestions sylvicoles y sont même mentionnés (taillis, futaies, vergers etc.) et on retrouve dans de nombreux cas jusqu'à l'essence exploitée.

4.2.2. Des communes particulièrement boisées

A partir de ces données nous avons pu calculer les surfaces boisées et donc évaluer le taux de boisement. Pour cela nous avons pris en compte l'ensemble des types de bois (taillis, futaies, vergers, châtaigneraie). Puis sur la carte nous avons représenté les proportions des différents types de peuplements rencontrés (figure 20).

La majorité des communes d'approvisionnement présente plus de 30 % de taux de boisement ; en revanche près de la moitié des espaces boisés est finalement occupée par de la châtaigneraie. Si l'on considère que ces châtaigneraies sont des vergers destinés à produire des fruits, alors cela ne doit pas être comptabilisé dans les espaces forestiers pouvant potentiellement produire du charbon de bois pour alimenter les forges. Pour la suite de l'étude, seules les surfaces de taillis ont été prises en considération.

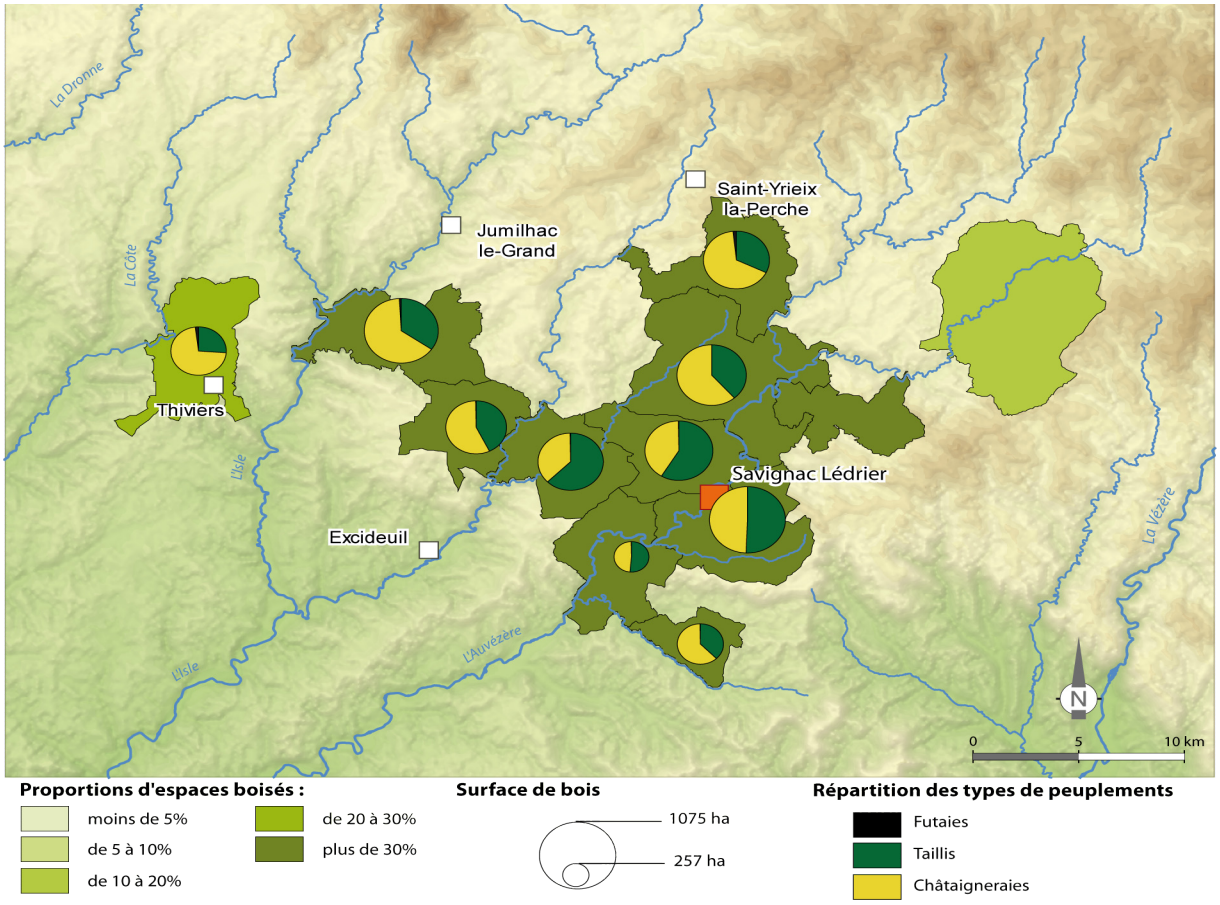


Figure 20 : Carte représentant les taux de boisement et la répartition en fonction des modes de gestion sylvicole sur les communes approvisionnant la forge de Savignac-Ledrier.

Si nous connaissons les surfaces exactes de taillis pour 10 communes (figure 21), en revanche, pour les communes de Lubersac et de Beyssenac en l'absence des récapitulatifs des états de section cette donnée n'a pas pu être recueillie. L'estimation des surfaces forestières sur les communes d'approvisionnement sera alors légèrement sous évaluée.

Surfaces de taillis sur les dix communes pour lesquelles une analyse du cadastre napoléonien a été possible

Commune	Superficie de la commune (ha)	Surface boisée (ha)	Surface gérée en taillis (ha)	Taux de boisement	Part du taillis dans le taux de boisement
Dussac	2054	702	301	34	43
Genis	788	257	132	33	51
Glandon	2692	831	264	31	32
Lanouaille	2386	807	506	34	63
Payzac	2571	888	340	35	38
Saint Mesmin	1107	1075	524	97	49
Sainte Trie	2959	420	183	14	44
Sarrazac	3023	1010	353	33	35
Savignac Lédrier	2690	870	512	32	59
Thiviers	2866	594	167	21	28
Somme		7454	3282		

Figure 21 : Présentation des données obtenues à l'issue de l'analyse des états de section sur 10 communes.

Ainsi à l'issue de cette analyse on peut évaluer le potentiel de taillis sur les douze communes à environ 3300 ha (figure 21 C).

4.2.3. Le monopole des taillis par la forge de Savignac-Lédrier

Bien que les surfaces de taillis ici estimées ne soient valables que pour la première moitié du XIXe siècle (les cadastres napoléoniens de ces communes étant datés de 1810 à 1820), il nous semble tout de même intéressant d'évaluer à partir de ces données si les ressources en taillis sont suffisantes pour un fonctionnement moyen de cette forge.

Nous l'avons vu précédemment, pour une année moyenne de fonctionnement, la forge aurait consommé entre 170 et 230 ha de taillis. Sur les 3300 ha de taillis disponibles ce prélèvement semble finalement assez minime avec uniquement 5 à 7 % des taillis prélevés. Mais pour étudier l'emprise d'un établissement sidérurgique sur l'environnement, il faut considérer que ce dernier fonctionne tous les ans à peu près de façon similaire. Pour que les taillis aient le temps de se régénérer nous avons considéré une période de rotation entre les coupes de 19 ans. Nous l'avons vu précédemment, cela représente entre 3200 et 4400 ha de forêts gérées en taillis destinés uniquement à l'alimentation de la forge de Savignac-Ledrier. Dès lors, si l'on considère que le maître de forge s'approvisionne toujours dans les mêmes communes, alors la part du taillis destinée à la forge devient considérable, avec une estimation minimale de 96 % et une évaluation maximale qui dépasse les surfaces de taillis disponibles (avec 130 % de prélèvement).

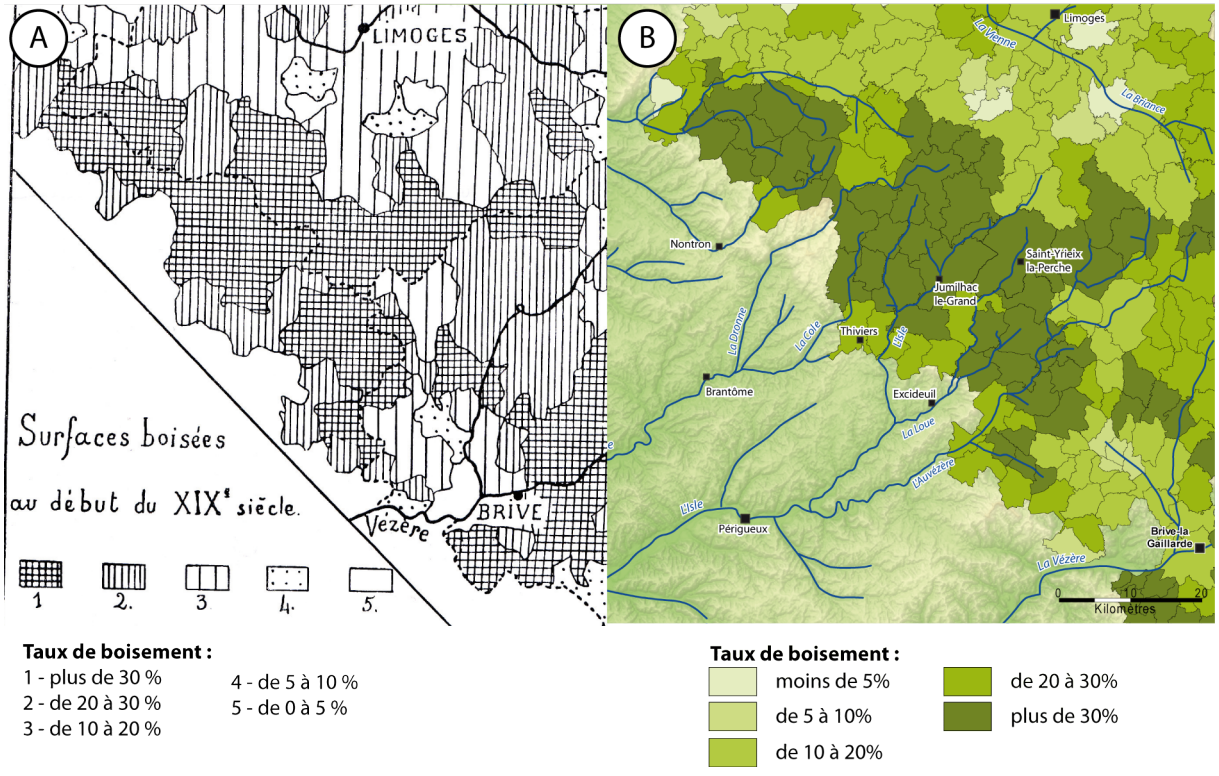
Bien évidemment l'approvisionnement en bois pour la forge de Savignac-Ledrier ne se résume probablement pas à ces seules 12 communes, il serait alors intéressant d'évaluer le potentiel forestier dans un rayon d'une quinzaine de kilomètres autour de la forge.

4.2.4. Vers une approche à petite échelle

L'évaluation des surfaces forestières dans un rayon plus large autour de la forge nécessite d'étudier les états de section de chacune des communes. Cela nécessite alors un important travail aux archives et pour plusieurs départements.

Dans les années 1940, A. Perpillou a réalisé ce travail sur l'ensemble des communes du Limousin et de ces marges. L'auteur a ainsi produit différentes cartes représentant le taux de boisement, la part de landes et de bruyères etc. Ce travail restitue une première image des paysages du Limousin du début du XIXe siècle (Perpillou, 1940) (figure 22 A et B).

Part des surfaces boisées par commune au début du XIXe s. d'après Perpillou (1940)



Taux de boisement :
1 - plus de 30 %
2 - de 20 à 30 %
3 - de 10 à 20 %
4 - de 5 à 10 %
5 - de 0 à 5 %

Taux de boisement :
moins de 5%
de 5 à 10%
de 10 à 20%
de 20 à 30%
plus de 30%

Figure 22 : De la « carte papier » au Système d'Information Géographique. A) Carte réalisée par Perpillou en 1940. B) Carte informatisée en utilisant les données de Perpillou (1940).

Il nous semblait donc possible d'utiliser ces recherches pour évaluer le potentiel forestier sur un nombre important de communes, mais si l'on étudie plus en détail ce document, force est de constater que les imprécisions sont nombreuses et empêchent même de calculer les surfaces forestières potentiellement exploitables par les activités métallurgiques.
En effet, malgré les vastes zones couvertes par l'étude de A. Perpillou, l'information rapportée manque de précision. Chaque taux de boisement a été replacé dans des classes afin de pouvoir représenter les données par des aplats de couleurs. Si les classes sont assez fines pour les faibles taux de boisement (compris entre 0 et 5 %, et entre 5 et 10 %) ; en revanche, l'amplitude s'élargit pour les valeurs supérieures à 10 %. On retrouve deux classes fermées : entre 10 et 20 % et entre 20 et 30 %, puis une classe ouverte associant l'ensemble des taux de boisement supérieur à 30 %. L'amplitude élevée de cette classe est d'autant plus problématique que sur les 243 communes concernées par la zone étudiée, 153 présentent des taux de boisement supérieurs à 30 %. Il est donc très délicat à partir de ces classes de calculer des surfaces précises de forêt.

De plus, en étudiant dans le détail les états de section de quelques communes déjà étudiées par A. Perpillou on constate un autre problème majeur. L'étude des cadastres napoléoniens visait à vérifier la validité du travail de Perpillou et surtout devait permettre d'élaborer une méthodologie pour estimer les surfaces boisées à partir de ces données. Or, à l'issue de cette analyse nous avons constaté que lors du calcul du taux de boisement l'auteur a assemblé les vergers, les taillis, les futaies, les plantations (figure 23).

		Résultats de l'étude détaillée des cadastres napoléoniens		
Communes	Taux de boisement (Perpillou, 1940)	Taux de châtaigneraie	Proportions des autres boisements	Taux de boisement
CHALUS	20 à 30%	17 %	6 %	20
CHAMPAGNAC-LA-RIVIERE	20 à 30%	17 %	6 %	23
CUSSAC	+ 30 %	18 %	12 %	32
DOURNAZAC	20 à 30%	14 %	10 %	25
LA CHAPELLE-MONTBRANDEIX	+ 30 %	22 %	12 %	30
SAINT-MATHIEU	+ 30 %	18 %	14 %	31
PAYZAC	+ 30 %	21 %	14 %	35
SAINT MESMIN	+ 30 %	19 %	18 %	36
SAINTE TRIE	+ 30 %	21 %	17 %	38
GENIS	+ 30 %	16 %	17 %	33
LANOUAILLE	+ 30 %	13 %	21 %	34
DUSSAC	20 à 30%	19 %	15 %	34
SARRAZAC	+ 30 %	22 %	12 %	33

Figure 23 : Comparaison sur 13 communes des taux de boisement proposés par Perpillou (1940) avec ceux obtenus à partir de l'étude fine des cadastres napoléoniens.

Prenons l'exemple de la commune de Champagnac-la-Rivière, le taux de boisement proposé par Perpillou est compris entre 20 et 30 %. A partir de nos recherches on obtient un taux de boisement plus précis, de 23 % ; mais en réalité 17 % des surfaces sont occupées par des châtaigneraies. Ces espaces boisés jouent un rôle important dans l'économie, elles fournissent des quantités non négligeables de fruits pour nourrir la population et le bétail (Allée *et al.*, 2006 ; Delhoume, 2006) mais ne rentrent pas dans la production de combustible pour les activités métallurgiques.

Cette association des vergers aux taux de boisement est problématique pour évaluer le potentiel des « forêts métallurgiques », les activités métallurgiques s'approvisionnant essentiellement dans les forêts de taillis. Il est donc impossible à partir de ces données d'évaluer les surfaces de taillis de chaque commune.

Pour aller plus loin dans cette analyse il sera nécessaire de poursuivre l'étude détaillée des états de section ; ce travail est d'ailleurs en cours avec la collaboration de S. Baron et J. Combeau (membres des groupes de recherche de la Route des Tonneaux et des Canons).

Cette première étude montre déjà l'impact d'une seule forge sur les espaces forestiers du Périgord Limousin. Or, dans l'aire d'approvisionnement de Savignac-Ledrier on retrouve plus de 25 forges et à travers le recensement des productions de ces forges réalisé précédemment (figure 8) on sait qu'au moins trois de ces forges produisent autant de fonte et de fer que la forge de Savignac-Lédrier au moins pour l'année 1789. On peut se poser la question de l'impact sur la ressource forestière et mettre en avant des problèmes de renouvellement de la ressource en bois. De plus, si l'on étudie l'ensemble des productions du Périgord Limousin, les forges à l'ouest (entre Nontron et Angoulême) produisent des quantités de fonte et de fer encore plus importantes. En effet, ces forges (Forge Neuve, Javerlhac, Ruelle ou encore Combiers) fournissent en grande partie la Marine Royale en canons. Il serait donc intéressant d'étudier plus en détail ce secteur pour évaluer l'emprise de ces établissements sur les forêts.

A la lumière des résultats obtenus sur la forge de Savignac-Lédrier, on perçoit les importants prélèvements en bois réalisés pour faire fonctionner les forges, ce qui vient

conforter les descriptions faites par les contemporains comme Delapouge cité par Peyronnet ou encore Texier Olivier (Texier-Olivier, 1808 ; Peyronnet, 1958). Mais pour confirmer cette surexploitation des forêts il est nécessaire de poursuivre ces analyses.

4.3. Les forêts du Périgord Limousin : des « forêts métallurgiques » à la production de bois de fente

4.3.1. Une consommation de bois sous concurrence

A travers l'analyse conduite sur la forge de Savignac-Ledrier, l'importante consommation en bois par les établissements sidérurgiques, déjà démontrée dans d'autres régions françaises, ne peut pas être négligée en Périgord Limousin. Cette démonstration vient justifier les nombreuses plaintes rapportées dans les procès ou les cahiers de doléances. Ces plaintes ne semblent pas être uniquement le résultat de conflits d'intérêt, prenant les espaces forestiers comme prétexte, mais témoignent réellement d'une phase de surexploitation des massifs forestiers du Périgord Limousin.

Si la quasi-totalité des taillis est entièrement destinée à la production du charbon de bois pour alimenter les fours alors que reste-t-il pour les autres activités industrielles ou encore pour les usages domestiques ? Les tuileries, les verreries également particulièrement consommatrices en bois entrent probablement en concurrence avec les établissements sidérurgiques. Pour vraiment mesurer l'importance du manque de bois au début du XIXe siècle, et mieux comprendre l'origine des plaintes, il serait intéressant à l'avenir de réfléchir à l'échelle d'un petit territoire, par exemple l'aire d'approvisionnement en bois de la forge de Savignac-Ledrier, et d'évaluer l'ensemble des prélèvements pour les autres industries, pour les usages domestiques etc.

La question de la concurrence est une question complexe à aborder car il faut prendre en considération l'ensemble des corps de métiers, utilisant presque tous à cette époque le bois comme énergie, ou comme matériau à mettre en œuvre.
Bien que tous n'utilisent pas des bois de taillis, si l'on observe l'image des espaces forestiers sur l'ensemble des communes dont nous avons étudié les cadastres napoléoniens, la place

des forêts de hautes futaies est très limitée, moins de 2 % sur l'ensemble des communes. En revanche, les châtaigneraies occupent des surfaces non négligeables, dans une période où l'on parle de conversion des vergers en taillis. Le débat est encore ouvert sur l'emploi du terme châtaigneraie ; sont-elles de véritables vergers ou ont-elle déjà été converties en taillis sans en changer le nom ? (Plas et Boumédiène, 2010). Pour répondre à ces questions on peut envisager une étude approfondie des cadastres napoléoniens en étudiant le montant de l'imposition des parcelles déclarées en châtaigneraie ; les montants imposés aux vergers semblent bien supérieurs à ceux des taillis. Ces premières impressions obtenues par l'analyse précise de quelques communes restent à approfondir.

4.3.2. La reconversion de ces « forêts métallurgiques » délaissées

Aujourd'hui ces taillis de châtaignier sont emblématiques d'une partie du territoire du Limousin avec notamment la « Châtaigneraie Limousine ». S'ils ont été exploités de façon intensive lors des phases de grande production des établissements sidérurgiques et notamment pour alimenter les affineries, on peut se poser la question des nouveaux usages de ces forêts à la fin du XIXe siècle où le charbon de terre vient progressivement remplacer le charbon de bois pour la réduction et l'affinage du fer. Ces « forêts métallurgiques » ont-elles retrouvé une nouvelle vocation ?

Quelques éléments de réponse à cette question sont notamment apportés par les travaux du Programme Collectif de Recherche « géohistoire et géoarchéologie de la forêt combustible en Limousin Poitou Charente » (dir Rouaud). En effet, dès la fin du XIXe siècle, les forêts du Périgord Limousin sont considérées « comme des espaces fournissant incontestablement le plus de bois de fente et de feuillards » (Plas et Boumédiène, 2010). Les forêts sont à nouveau gérées avec des coupes réglées pour produire cercles de tonneaux, piquets, paniers etc. « Sur les 12 000 hectares plantés, 10 000 hectares sont à dix huit ans, en vue de la production de carrassonnes, à raison de 20 000 par hectare et 2 000 hectare à sept ans pour les feuillards à bois de cercle dont le produit est de trente milliers par hectare. Quant aux 35 000 hectares de mélangé, on peut dire que 45 % environ du peuplement soit à peu près 16 000 hectares sont exploités à 20 ans » (Barral, 1880, cité dans Plas et Boumédiène, 2010). Le territoire autrefois métallurgique s'est progressivement transformé en « pays des feuillardiers ».

Aujourd'hui ces taillis jouent à nouveau un rôle de combustible. Face au coût toujours plus élevé des énergies fossiles, nombreux sont ceux qui se tournent à nouveau vers cette énergie renouvelable qu'est le bois. A partir de nos observations nous pouvons donc mettre en garde l'ensemble des usagers des risques encourus si les massifs sont exploités de façon intensive, avec des rotations de plus en plus courtes pour satisfaire l'ensemble des demandes. Ces modes de gestions sylvicoles conduisent à une diminution de la productivité des taillis, à un épuisement des sols etc. ce qui est déjà constaté en Périgord Limousin (Bourgeois, 2004).Quelle que soit l'énergie employée, il y a des risques de surconsommation, il est alors essentiel d'apprendre à bien gérer les ressources.

Conclusion

Les documents historiques, un bon moyen d'étudier l'histoire des « forêts métallurgiques »

Il s'agissait à travers cette étude, d'évaluer la pertinence des documents à notre disposition pour étudier les « forêts métallurgiques ». La métallurgie du fer en Périgord Limousin pour les Temps Modernes et l'Epoque Contemporaine, offre suffisamment de travaux, de documents de synthèses pour mettre en place cette démarche méthodologique. D'une part, les enquêtes statistiques, les travaux centrés sur la sidérurgie nous ont permis d'estimer des surfaces de taillis nécessaires au fonctionnement des forges.

D'autre part les états de section du cadastre napoléonien permettent d'accéder à une image des paysages forestiers et notamment des surfaces gérées en taillis. Si la comparaison entre surfaces boisées consommées et surfaces boisées disponibles n'est pas encore envisageable pour l'ensemble du territoire Périgord Limousin compte tenu d'un grand nombre de forges encore non renseignées et de l'important travail à réaliser aux archives pour analyser les nombreux états de section, l'analyse comparative réalisée sur la forge de Savignac-Ledrier apporte aujourd'hui de nouveaux éléments pour affirmer que les activités métallurgiques prélevaient des quantités considérables de bois de taillis. On peut se poser la question des périodes de rotations appliquées sur les taillis. Pour répondre à ces fortes demandes, les périodes de repousse n'ont elles pas été écourtées ? Des textes en témoignent, mais sont-ils objectifs ? Il faut donc envisager d'autres approches pour tenter d'y répondre.

De l'analyse des textes à une approche archéobotanique : la nécessité de l'interdisciplinarité

Pour aller au delà des textes, sortir de la subjectivité de l'écrit, l'approche archéobotanique s'avère indispensable pour étudier les modes de gestion de ces « forêts métallurgiques ». Les approches paléoenvironnementales et archéobotaniques, largement développées par la suite dans ce travail de thèse, offrent d'excellents résultats à croiser aux informations historiques.

C'est sur un vestige archéologique un peu particulier que notre attention s'est principalement portée : les plateformes de charbonnage. Ces vestiges sont particulièrement intéressants puisqu'ils sont les témoins directs de la production de charbon de bois dont une grande partie a servi à alimenter les fours de métallurgie.

L'analyse des charbons de bois retrouvés sur ces plateformes nous permettent aujourd'hui d'étudier les faciès forestiers à la fois dans le temps et l'espace.

Chapitre 3 : Etudier les plateformes de charbonnage pour restituer les sylvofaciès des « forêts métallurgiques »

Introduction

Les approches paléoenvironnementales et archéobotaniques sont des approches intéressantes à développer. Pour compléter l'approche historique et pour étudier des périodes dépourvues de documents écrits. Etudes des pollens, des graines et surtout des charbons nous permettent aujourd'hui de comprendre l'histoire des paysages forestiers étroitement liés aux activités humaines. Etudier les « forêts métallurgiques » c'est restituer la physionomie des peuplements forestiers et retrouver les modes de gestion sylvicole afin d'évaluer s'il existe une sylviculture particulière pour les activités métallurgiques. Les textes apportent de nombreuses informations et, pour certaines périodes, il a précédemment été démontré qu'il était envisageable de retrouver les surfaces nécessaires à l'alimentation des fours. En revanche, ces études peuvent être limitées concernant la physionomie des peuplements, les essences exploitées etc. De plus, pour les périodes plus anciennes, c'est-à-dire antérieures aux Epoques Modernes et Contemporaines, les corpus documentaires sont beaucoup plus faibles, et ne permettent que très rarement de restituer une image des « forêts métallurgiques ». Le recours à un autre type de documentation est dès lors indispensable.

Les quantités de combustible nécessaires au fonctionnement des fours ont conduit à des gestions particulières des espaces boisés. Des taillis gérés à plus ou moins courtes révolutions ont fait l'objet de charbonnage intensif laissant de nombreux vestiges en forêt ou encore sur les versants déboisés des massifs montagneux. Ces vestiges archéologiques apportent des informations à la fois spatiales, botaniques et temporelles des anciens

massifs forestiers exploités. Les recherches conduites depuis maintenant plus de 25 ans sur ces vestiges archéologiques ont permis de faire évoluer les problématiques autour des forêts combustibles, tout en affinant les protocoles analytiques. Le recensement des vestiges, les protocoles de prélèvement des charbons et les analyses archéobotaniques ont progressivement été affinés pour restituer de manière toujours plus fidèle l'image des anciens espaces charbonnés (Bonhôte, 1992, 1998 ; Davasse, 1992, 2000 ; Izard, 1992 ; Euba, 2008 ; Ludemann *et al.*, 2004 ; Allée *et al.*, 2011 ; Oillic, 2011).

Il convient, dans le cadre de ce chapitre, de montrer l'intérêt que présentent l'étude des plateformes de charbonnage pour conduire des recherches très approfondies sur les anciennes forêts charbonnées et donc, dans certains contextes, des « forêts métallurgiques ». Pour bien appréhender ces vestiges, il est primordial de bien comprendre le principe et le fonctionnement de l'activité de charbonnage.

L'étude des textes anciens, les recherches ethnographiques et les approches expérimentales permettent de retrouver la gestuelle des charbonniers, de comprendre les processus de carbonisation et donne également de nombreuses informations aux géographes, historiens, archéologues et archéobotanistes pour mieux interpréter les restes archéologiques. Si les informations spatiales et temporelles apportées par ces vestiges ont déjà largement été étudiées (Métailié et Jalut, 1991 ; Fabre, 1992 ; Bonhôte, 1998 ; Davasse, 2000), en revanche l'information botanique acquise à travers l'analyse des charbons de bois nécessite encore d'être approfondie. En effet, depuis maintenant 10 ans, les méthodes en anthracologie ont évolué (Chabal, 1997 ; Théry-Parisot, 2001), avec la mise en place de procédés pour restituer le diamètre des bois brûlés (Marguerie et Hunot 2007 ; Nelle, 2002 ; Dufraisse, 2002 ; Ludemann *et al*. 2004). Ces nouvelles méthodes sont particulièrement pertinentes à employer pour l'étude des « forêts métallurgiques » mais s'avèrent avoir principalement été élaborées et testées sur des contextes de foyers ouverts comme les foyers domestiques, ce qui est très éloigné des contextes de charbonnage.

A ce jour, rares sont les expérimentations réalisées sur des charbonnières. Trois d'entre elles avaient pour objectif de tester la représentativité des spectres anthracologiques (Fabre, 1992 ; Ludemann, 2006, 2008). Dans le cadre de cette étude, trois charbonnières expérimentales ont été réalisées permettant d'affirmer la pertinence d'étudier les plateformes de charbonnage pour aborder la question des « forêts métallurgiques ».

1. La production de charbon de bois, une activité qui laisse des traces dans les paysages

Les activités métallurgiques ont consommé d'importantes quantités de charbon de bois quelle que soit la période. Pour répondre à cette demande, les charbonniers installés au cœur des massifs forestiers s'organisent pour produire chaque jour d'importantes quantités de charbon de bois. Ces activités ont façonné les paysages forestiers, nécessitant une gestion des ressources en bois. Elles ont laissé de nombreux vestiges archéologiques en forêt ou encore dans des espaces aujourd'hui ouverts. Ces vestiges nous intéressent tout particulièrement pour étudier et restituer l'histoire des « forêts métallurgiques ».

La fabrication du charbon de bois consiste à réaliser une carbonisation lente, avec un minimum d'oxygène afin de transformer le bois en un charbon le plus pur possible. La transformation du bois en charbon de bois peut être réalisée de différentes manières ; en fosse, en meule ou encore en four. Dans le cadre de cette étude, c'est la carbonisation en meule qui sera au cœur de notre développement, puisque ce sont les vestiges les plus couramment retrouvés sur la zone étudiée dans le cadre de cette recherche. Mais comprendre l'intérêt de ces vestiges archéologiques passe nécessairement par une bonne connaissance de l'activité à l'origine de ces restes. La construction des plateformes, la façon d'organiser les bois, la conduite de la carbonisation et les modes de ramassage du charbon de bois sont des éléments importants à mesurer pour établir des protocoles adaptés au développement de l'anthracologie sur ces sites.

Pour comprendre le fonctionnement de la carbonisation en meule, les descriptions ne manquent pas. Textes anciens, études ethnologiques, témoignages de charbonniers ou encore reconstitutions patrimoniales ou expérimentales nous permettent aujourd'hui de d'appréhender les principes et le fonctionnement de cette activité aujourd'hui quasiment disparue. C'est sur l'ensemble de ces sources que nous nous appuierons pour développer les principes de la carbonisation des bois en meule.

On sait que la pratique du charbonnage est réalisée au moins depuis l'Antiquité, puisque Théophraste décrit, au IIIe siècle av JC, le procédé de carbonisation en meule (Amigues, 1993). Finalement on ne retrouve que peu de textes aussi anciens. Pline évoque également

cette activité de charbonnage, mais de façon très sommaire (Pline, traduit et édité en 1962).

Il faut ensuite attendre le XVIIIe siècle pour trouver des références plus nombreuses sur la carbonisation en meule. On pense notamment à l'article de Duhamel du Monceau rédigé pour l'encyclopédie des Arts et des Métiers, entre 1774 et 1778 *« Art du Charbonnier ou manière de faire le charbon de bois »*. Même si l'auteur estime que cette activité est simple et ne nécessite pas d'en faire une description détaillée, il écrit cette partie pour venir renforcer la description sur les métiers liés à la production de fer. *« La manière de faire le charbon de bois est assez simple pour que l'art du charbonnier paraisse peu intéressante […] Avant de pousser plus loin la description des différents arts qui s'occupent à préparer le fer, j'ai cru devoir donner ici l'art de faire le charbon de bois, sans lequel on ne saurait exécuter aucun de ces travaux. »* (Duhamel du Monceau, 1774 p 645). Particulièrement bien illustré, ce document de plus de cinquante pages détaille richement sur les méthodes à suivre pour construire et conduire une charbonnière.
Au XIXe siècle, les idées pour produire du charbon de bois semblent fleurir. Les propos de Guettier dans son traité de la fonderie en France illustre bien ce phénomène ; « no*us n'en finirions pas, si nous voulions indiquer tous les procédés de carbonisation qui ont été mis en œuvre ces dernières années »* (d'après A. Guettier, 1844 cité par Benoit, 1990 p 104). Il ne s'agit pas ici de détailler toutes les méthodes.

Plus récemment et ce depuis les années 1940, l'étude du métier de charbonnier a également intéressé plusieurs auteurs depuis les années 1940. On trouve donc des résultats d'études ethnologiques (Battesti, 1992 ; Musset, 1996), des recueils de témoignages de charbonniers (Larcher, 1986 ; Bastard *et al.*, 2000 ; Schlosser, 2004), des ouvrages techniques sur la production de charbon de bois et sur ses usages (Septembre et Lepoivre, 1941). Ayant pour principale vocation de conserver ce savoir-faire transmis essentiellement par voie orale, de nombreux témoignages sont alors retranscrits pour tenter de figer une gestuelle ancestrale. Ces études permettent d'obtenir une image très précise de l'activité de charbonnage à la fin des XIXe et XXe siècle.

Enfin, on retrouve dans de nombreuses régions, Vercors, Vosges, Alsace, Cher, des associations qui souhaitent préserver les anciens métiers. Celles-ci organisent régulièrement des manifestations autour d'une charbonnière en fonctionnement. C'est en rencontrant les

membres de l'association « des Charbouniers de Quincy » dans le Cher, que nous avons pris la mesure de cette activité. Les échanges avec eux et leur présence lors de nos expérimentations menées aux Tuileries de Pouligny, en septembre 2008, nous ont permis d'appréhender réellement le fonctionnement d'une meule et d'évaluer l'impact que peut avoir la gestuelle des charbonniers sur les résidus charbonneux laissés sur les plateformes.

Grâce à ces différentes sources, nous avons pu appréhender l'activité de charbonnage dans sa globalité. A travers nos lectures, nos rencontres et nos expériences, quatre étapes majeures du travail du charbonnier ont été identifiées :

- l'aménagement de la plateforme
- la construction de la meule
- la cuisson
- la récolte du charbon de bois

Nous développerons donc chacune de ces étapes en nous appuyant sur l'ensemble des sources d'informations dont nous disposons.

1.1. Aménagement des plateformes : l'emplacement, un choix stratégique marquant le paysage

L'aménagement des plateformes sur lesquelles sont érigées les meules est non seulement une étape importante dans le travail du charbonnier, mais elle l'est également dans le cadre de recherche en géoarchéologie des forêts charbonnées. En effet, sans construction, sans modification importante de la topographie, il serait alors difficile de retrouver aujourd'hui les traces de ces activités.

La description faite par Duhamel du Monceau évoque deux conditions importantes dans le choix d'implantation des plateformes de charbonnage. Il faut que les ressources en bois soient abondantes à proximité et que le sol soit propice. « *Les ouvriers cherchent à s'épargner du travail, ils essaient de placer leur faulde à portée des cordes, pour faciliter le transport du bois ; ils choisissent aussi un endroit un peu élevé, afin que, s'il venait à pleuvoir, l'eau ne rentre pas sous le fourneau. Ils diminuent encore leur travail, quand ils peuvent trouver des places unies ou bien des endroits où l'on ait déjà conduit du charbon. [...] Pour que la place soit propre à faire (comme ils disent) un bon cuisage, il faut que le terrain ne soit ni*

pierreux, ni sableux » (Duhamel du Monceau, 1774 p 661-662). On voit bien à lecture de cet article que la construction des plateformes n'était pas réalisée de façon aléatoire ; cela se comprend d'autant plus lorsque l'on connait, par des témoignages ou encore après l'avoir expérimenté, l'énergie qu'il faut déployer pour aménager l'emplacement sur lequel sera érigée la meule.

Dans certains contextes, cela nécessite d'importants aménagements, coupe des arbres puis terrassement, voire construction de plateformes soutenues par des murets de pierres (figure 24). On retrouve, dans certaines forêts ou encore sur des versants accidentés de montagnes, des plateformes à des endroits que l'on juge aujourd'hui inaccessibles. Ces dernières sont talutées, soutenues par des murs en pierres sèches pouvant atteindre jusqu'à 4 mètres de haut pour certaines (Davasse, 2000 ; Rouaud, 2007).

Lorsqu'un charbonnier arrive sur un nouveau secteur, en l'absence d'anciennes plateformes de charbonnage, ce dernier est obligé d'en créer une. Pour cela il commence par couper le bois autour de l'emplacement qu'il a choisi, puis prépare le sol, creusant à l'amont et formant un talus à l'aval (figure 24). Généralement de formes circulaires, les plateformes peuvent être de différentes tailles, tout dépend bien sûr de l'espace disponible mais également de la taille de la meule que le charbonnier souhaite construire par la suite.

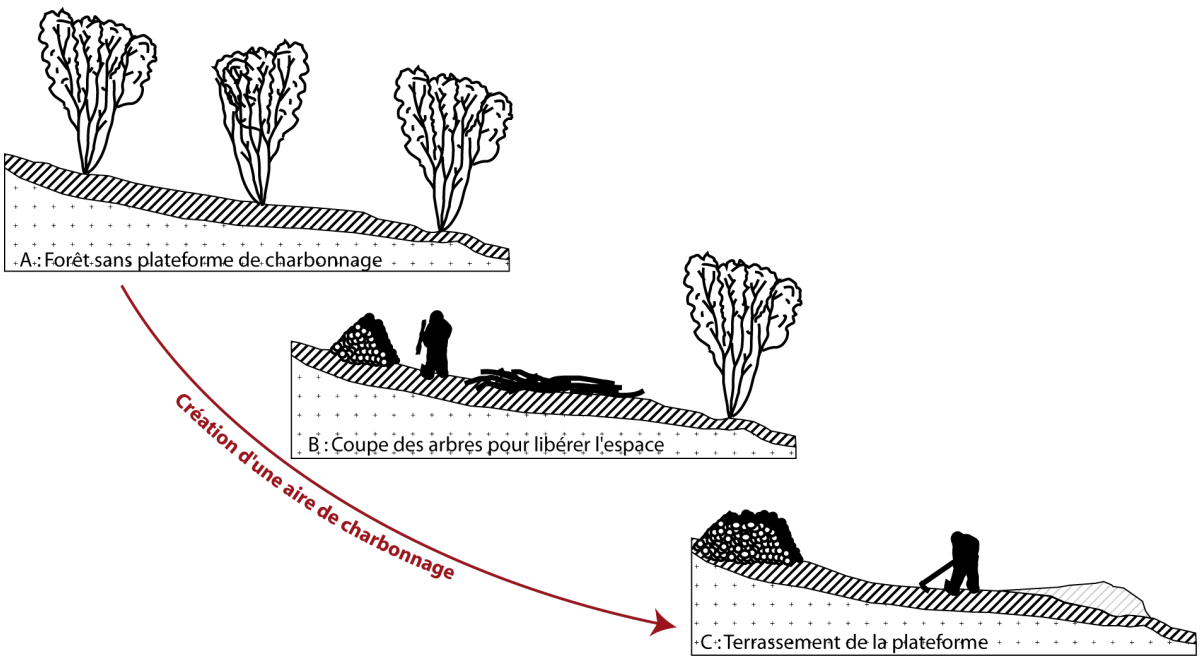


Figure 24 : Aménagement d'une plateforme de charbonnage (schéma S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)

En effet, il doit aménager une plateforme toujours plus grande que la taille de la meule, de façon à pouvoir circuler autour pour surveiller la cuisson.
Selon la topographie du milieu, l'aménagement sera plus ou moins fastidieux ; plus le terrain est accidenté plus le terrassement sera important et marquera le paysage.

1.2. La construction de la meule

Une fois la plateforme établie, le charbonnier finit de couper les bois dont il a besoin pour sa carbonisation ; il prépare ses tas de bois pour enfin ériger sa meule. D'après de nombreux textes, avant de construire la meule, le charbonnier procède à un choix des bûches à employer.

1.2.1. Le choix des bois

Les essences de bois semblent jouer une faible importance pour le charbonnier. En revanche, Duhamel du Monceau précise qu'il faut choisir l'espèce la plus commune et que la qualité du charbon varie selon les espèces. « *On peut faire du charbon avec toutes sortes de bois ; mais une première condition est, de n'employer que du bois dont l'espèce soit commune, car on vient de le voir, la consommation en étant très considérable, le prix doit être modique, puisque le bois diminue presque des trois quarts de son volume en le convertissant en charbon. La qualité du charbon varie suivant l'espèce de bois qu'on brûle. On fait avec les bois durs du charbon qui donne beaucoup plus de chaleur. C'est ce qui fait que dans certaines occasions, on donne la préférence au charbon d'épine à celui de chêne ; le charbon de hêtre, celui de charme viennent ensuite, mais le charbon de bois dur est sujet à beaucoup pétiller, ce qui dans certains cas peut produire des inconvénients. Les charbons de bois tendre, comme le bouleau, le tremble et le peuplier, le tilleul, le pin n'ont pas ce défaut ; s'ils ne font pas autant de chaleur que les autres, on pense qu'ils procurent plus de douceur aux métaux.* » (Duhamel du Monceau, 1774, p. 654). Cette description entre bois dur et bois tendre se retrouve régulièrement ; les maîtres de forge précisent souvent qu'ils privilégient le charbon de chêne ou de hêtre (charbon dur) pour la réduction du minerai, en revanche, ils choisissent des charbons plus tendres, plus riches en carbone pour les étapes d'affinage ; c'est le cas notamment du châtaignier.

Le choix du bois va au delà de la sélection de l'essence. Dans son article, Duhamel du Monceau va jusqu'à indiquer « *l'âge que doivent avoir les arbres qu'on abat pour faire du charbon* ». Duhamel du Monceau décrit l'utilisation principalement de bois de petit à moyen diamètre *: « Comme il faut que l'action du feu pénètre jusqu'au centre des morceaux de bois qu'on cuit en charbon, il y aurait de l'inconvénient à employer pour cet usage de trop gros bois. […] Voilà bien des raisons pour destiner à faire du charbon les taillis de 18 à 20 ans, qui fournissent des rondins de 6 à 12 pouces de circonférence, plutôt que des branchages qui ayant presque toujours le défaut d'être tordus, occasionnent des vides dans l'intérieur du fourneau* (Duhamel du Monceau, 1774, p. 654). En revanche on observe sur quelques représentations de charbonnage des pratiques différentes. La représentation faite en 1572 par Biringucio dans « La pyrotechnie » montre un charbonnier plaçant une souche dans une fosse pour faire du charbon de bois, nous sommes loin des tiges bien droites issues des taillis. La représentation du XVIe siècle faite par Heinrich Gross montre quant à elle une utilisation de bois d'assez gros diamètre, puisque les bûches sont refendues avant d'êtres placées dans la meule (Pierre et Gaxatte, 2011).

Cette utilisation de tous les types de bois est rapportée par différents historiens qui évoquent des changements dans les choix des types de bois employés pour le charbonnage. D'après J.F. Belhoste et J. Boissière le taillis ne semble pas être privilégié avant le XVIIIe siècle ; les bois de futaies servent également à approvisionner les forges en région parisienne ou encore en Bretagne (Belhoste, 1990 ; Boissière, 1990)

A l'heure actuelle, il est difficile d'établir une loi générale sur le choix des bois pour la carbonisation en meule. A partir des études ethnologiques et de nos rencontres avec des charbonniers, nous avons pu observer que tous emploient aujourd'hui des bois de petits à moyens diamètres ; rares sont les charbonniers qui évoquent l'utilisation de très gros bois qu'il est nécessaire de refendre ou encore des bois de branches tordues qu'il est difficile à assembler pour construire la meule.

Tous les types de bois permettent de faire du charbon, en revanche, les charbonniers semblent privilégier la solution de facilité, c'est à dire utiliser du bois de petit diamètre provenant de taillis, facile à couper et simple à assembler lors de la construction de la meule.

1.2.2. Un empilement de bois très serré

Quels que soient les types de bois, pour les transformer en charbon il est nécessaire d'assembler les bûches de façon très serrée, le plus souvent verticalement, ce qui permet ainsi une carbonisation relativement homogène sur l'ensemble de la meule.

Depuis l'Antiquité le même principe semble être appliqué. « *Pline dit qu'on arrange les bûches en pyramide, qu'on couvre le bûcher avec de l'argile et qu'après y avoir mis le feu, on perce le haut pour donner une issue à la fumée* » (Duhamel du Monceau, 1774, p. 660). Dans son article Duhamel du Monceau procède à une description particulièrement précise de la construction d'une meule. « […] *Les premiers morceaux de bois dont on environne le pied du mât, doivent être secs, et ils s'y appuient par leur bout supérieur ; leur bois inférieur porte à terre, et ils sont un peu inclinés. Autour de cette première enceinte de morceaux de bois sec on en forme une seconde avec la corde à charbon, en appuyant les bâtons qui forme cette enceinte sur ceux qu'on a placés en premier lieu, cette seconde enceinte […] jusqu'à ce que l'aire aplanie et marquée soit entièrement couverte de morceaux de bois placés presque debout.* » (Duhamel du Monceau, 1774 p 660-661). Cette description du XVIIIe siècle évoque une construction sur trois étages, mais cela dépend vraiment du charbonnier.

Dans cette description, l'auteur évoque une construction autour d'un mât central ; il semble que le même procédé soit représenté dans certaines iconographies, comme dans les dessins de Heinrich Gross (XVIe siècle) (figure 25).

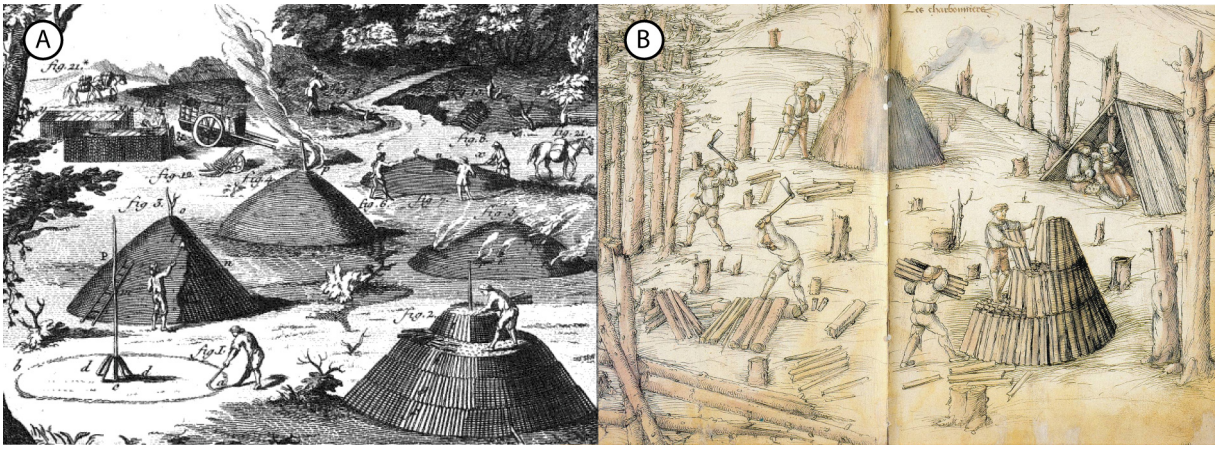


Figure 25 : Iconographie représentant la construction des charbonnières en meule.
(A), Duhamel du Monceau 1774, (B) Heinrich Gross (XVIe siècle)

L'utilisation d'un mât central présenté par Duhamel du Monceau semble être une construction un peu particulière. A la lecture des études ethnologiques et d'après nos observations sur des charbonnières actuelles réalisées dans le cadre associatif ou encore expérimental, on observe un autre protocole de construction. La meule est érigée autour d'une cheminée centrale et non pas autour d'un mât (Battesti, 1992 ; Bastard *et a*l.; 2000 ; Burri, 2008). Cette cheminée, triangulaire ou carrée, selon la façon de procéder des charbonniers, est construite par un agencement de petits rondins de bois généralement de moins de 5 cm de diamètre et inférieur à 50 cm de long (figure 26). Les bûches viennent ensuite s'appuyer sur cette cheminée pour construire 1, 2, 3 étages et parfois plus (figure 27, B et C).

Figure 26 : Construction de la meule. (A, B) la cheminée centrale, (C,D) l'agencement des bois sur plusieurs étages (clichés S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)

La construction par étage ne peut être réalisée qu'en respectant une taille standard pour l'ensemble des bûches mis au sein d'un même étage. Pour cela, les charbonniers ont une sorte de gabarit pour couper des bûches de taille similaire. De 1 mètre, 80 ou 50 centimètres, la taille des bûches varie en fonction des régions mais également de la technique employée par le charbonnier. L'utilisation de petites bûches conduit souvent la construction d'un nombre plus important d'étages que l'utilisation de bûches de grande longueur.

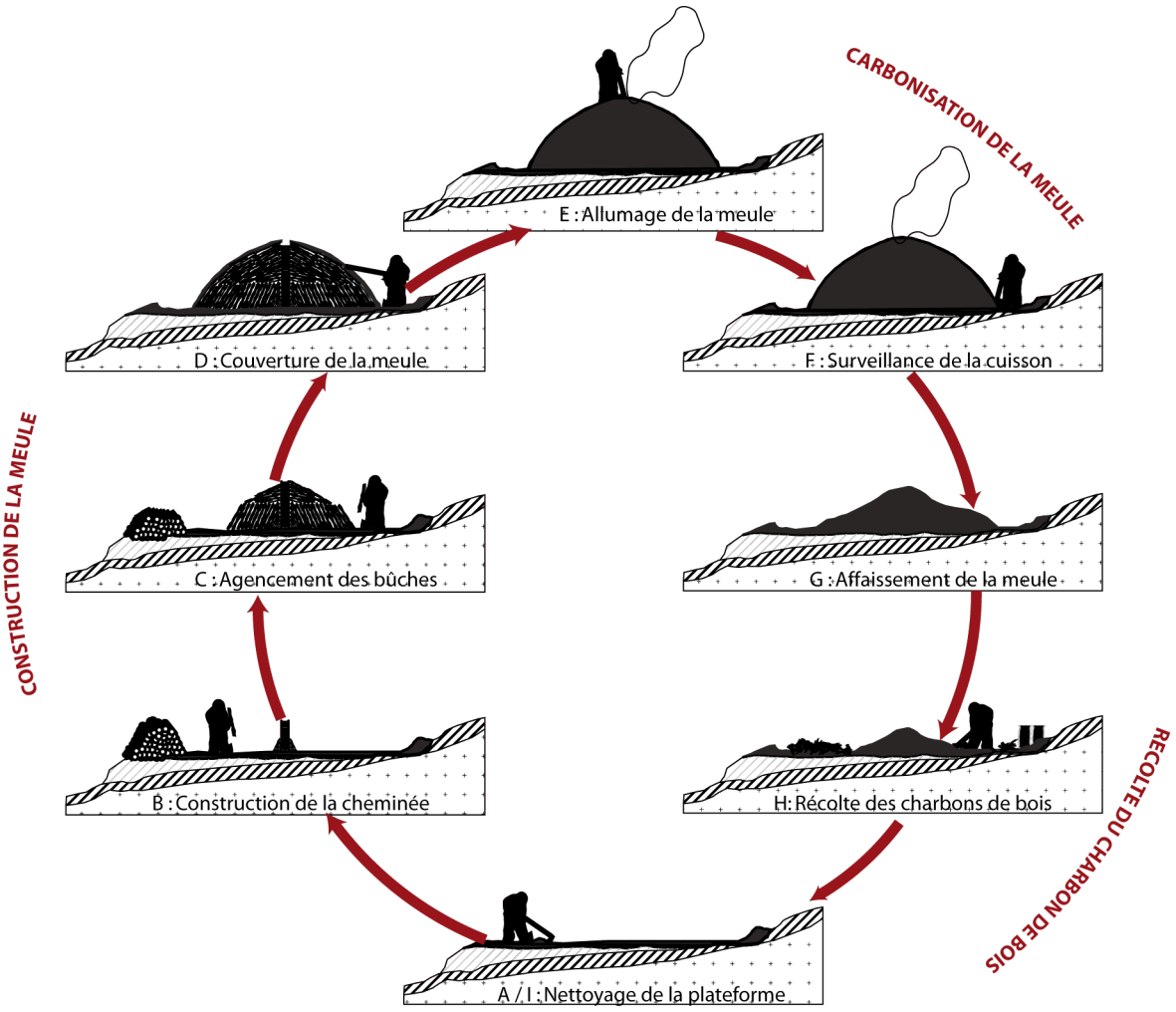


Figure 27 : Schématisation des différentes étapes de la carbonisation en meule (schéma S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)

1.2.3. Couvrir la meule

Pour permettre la carbonisation de la meule, il est indispensable de la couvrir, permettant ainsi de contrôler les arrivées en oxygène sans quoi le bois se consumerait complètement sans produire de charbon de bois (figures 27 D et 28).

Pour évoquer cette étape, Duhamel du Monceau parle de « *manière de bouger le fourneau* ». Il décrit une fois encore précisément la gestuelle du charbonnier. « *Le fourneau étant ainsi dressé, il reste, pour l'achever, une autre opération, mais qui exige moins d'adresse que les précédentes : il s'agit de le bouger ou de le couvrir de terre et de cendre : on emploie à cet usage la terre qui se trouve aux environs du fourneau* » (Duhamel du Monceau, 1774, p. 662).

Une nouvelle fois, à partir des études ethnologiques et nos observations, nous avons pu constater d'autres méthodes pour couvrir les meules. Selon le matériel à disposition du charbonnier, cette couverture peut être composée de litière végétale (feuilles, mousse, paille etc.) recouverte ensuite de terre. On rencontre également l'emploi de carrés de terre sur lesquels l'herbe est encore présente. *« L'usage très commun en Allemagne de bouger les fourneaux avec des pièces de gazon carrées. Lorsque la nature du terrain le permet, cette méthode est préférable à toute autre. On coupe le gazon sur la place même où le fourneau doit être placé même […] »* (Duhamel du Monceau, 1774, p. 664). La partie végétalisée permet ainsi d'éviter à la terre de s'immiscer entre les bois ce qui étoufferait le feu. (figure 28)

Figure 28 : Couvrir la meule avec de la paille (A) puis de la terre (B) (clichés S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud).

En fonction de la hauteur et de la taille de la meule, différents procédés peuvent être mis en place pour maintenir la couverture de la meule. Dans certains cas, les charbonniers donnent plus de « pied » à la meule, c'est à dire qu'ils inclinent de plus en plus les bûches en s'éloignant du centre de la meule, permettant ainsi à la couverture de tenir sans aucun support. Dans d'autres contextes, la meule étant plus haute, la pente de la charbonnière est trop importante pour que la couverture se maintienne seule ; les charbonniers installent alors des morceaux de bois à la fois verticalement et horizontalement pour apporter un soutien à la construction et pour éviter ainsi le glissement de la couverture.

1.3. Le temps de la carbonisation

Le troisième temps dans le travail du charbonnier, et probablement le plus important pour la production de charbon de bois, est celui de la carbonisation. Cette étape nécessite la plus grande vigilance à chaque instant. Depuis l'allumage à l'affaissement de la meule, le charbonnier doit être toujours présent pour éviter que la meule ne s'embrase.

1.3.1. L'allumage de la meule

Après avoir couvert la meule, le charbonnier peut mettre le feu à l'empilement de bois initiant ainsi la carbonisation. Une fois encore, il est assez intéressant d'observer différents procédés pour allumer la meule ; cela dépend principalement des différents modes de construction.

D'après les écrits de Duhamel du Monceau, l'allumage se fait à la base de la meule. En effet, lors de la construction, le charbonnier aménage une sorte de canal au pied de la meule conduisant jusqu'au mât central. Ainsi à l'aide d'une perche, le charbonnier pousse des braises par cet orifice jusqu'au mât central.

On connait d'autres manières de procéder, avec un allumage de la meule par le haut, Duhamel du Monceau l'évoque même dans son article sur « l'art du charbonnier » mais il ne semble pas avoir rencontré ce type d'allumage. *« Les charbonniers qui ne ménagent point la galerie, mettent le feu par le haut du fourneau, je ne puis approuver leur méthode »* (Duhamel du Monceau, 1774, p. 661).

Ce protocole d'allumage par le haut qui semble méconnu par Duhamel du Monceau est pourtant le mode le plus répandu à travers les études ethnologiques et les associations continuant à produire du charbon de bois. Pour allumer la meule, le charbonnier monte sur la meule à l'aide d'une échelle et vient jeter des braises au fond de la cheminée (figures 27 E et 29). Selon les contextes régionaux et le savoir-faire du charbonnier, l'allumage peut être plus ou moins rapide. Dans certains contextes, le charbonnier aménage au pied de la cheminée un petit tas de brindilles qui, en s'enflammant, amorce rapidement le processus de carbonisation. Le feu prend peu à peu et gagne tout le conduit de la cheminée.

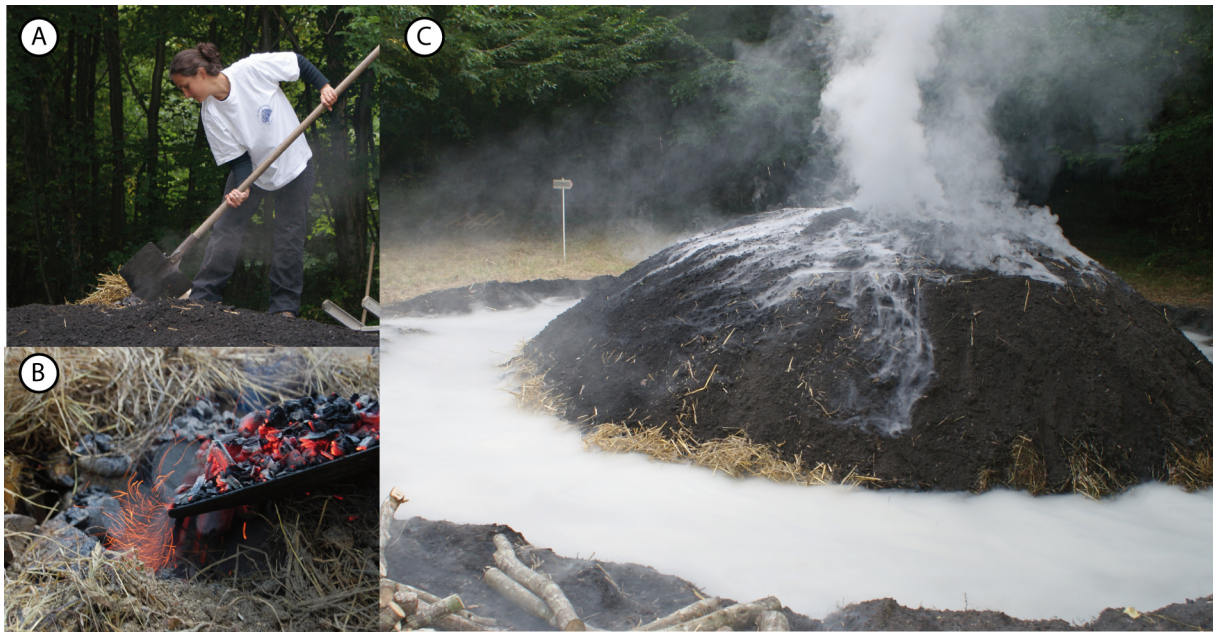


Figure 29 : Allumage de la meule par dépôt de braises au fond de la cheminée (A , B) et début de carbonisation (C) (Cliché S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)

Dans d'autres cas, l'allumage est beaucoup plus long : des bûchettes enflammées sont jetées dans la cheminée et pour être sûr que le feu prenne bien, le charbonnier doit parfois donner « à manger » à la meule pendant plusieurs heures en ajoutant des bûchettes dans la cheminée (Musset, 1996 ; Bastard *et al.*, 2000 ; Burri, 2008).

1.3.2. Un feu qui couve

Une fois l'allumage réalisé, il s'agit de suivre attentivement la « cuisson » de la charbonnière. En ce qui concerne les charbonnières allumées par le haut, pour éviter que le feu ne se propage trop vite et que le bois ne soit réduit en cendre, il faut reboucher le sommet de la meule avec de la litière et de la terre.

La carbonisation doit être lente, régulière et homogène. Pour y parvenir, le charbonnier dose l'aération à l'aide d'évents qu'il peut ouvrir et fermer en perçant la couverture de la charbonnière. Il est difficile de décrire cette phase, puisqu'en réalité le charbonnier est guidé principalement par son ouïe, son odorat et sa vue. Les crissements du bois, les fumeroles blanches ou bleues sont autant d'indices à ne pas négliger pour évaluer si la carbonisation se déroule dans de bonnes conditions.

Duhamel du Monceau raconte les ressentis du charbonnier et détaille quelques points montrant que la carbonisation se déroule dans de bonnes conditions. « *On juge que le feu se distribue bien, quand l'affaissement du fourneau se fait également ; s'il s'affaissait trop dans quelques endroits, on y mettrait de la terre, et il faudrait faire des ouvertures aux endroits où il ne se ferait point d'affaissement* » (Duhamel du Monceau, 1774, p. 666). En se transformant en charbon de bois, les bûches se fragilisent, cassent, et petit à petit la meule s'affaisse sous son poids. En se tassant, les charbons de bois créent des fractures dans la couverture de la charbonnière par lesquelles l'air s'infiltre aisément, réamorçant de plus belle le feu encore présent au cœur de la meule (figures 27 F, G et 30). Le charbonnier doit donc, de jour comme de nuit, s'assurer qu'aucune ouverture trop importante ne se produise. Quelles que soient les sources, toutes évoquent un travail sur plusieurs jours, allant parfois à plus d'une semaine en fonction de la taille des meules.

couverture conduisant à l'embrassement du charbon (C, D) (Clichés S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)

Textes du XVIIIe siècle et études ethnologiques expliquent que la carbonisation débute toujours en bas, au centre de la meule, à la base de la cheminée ou du mât ; puis le feu se propage jusqu'en haut de la meule.

Si quelques travaux proposent une restitution de l'évolution de la carbonisation dans les meules, la plupart s'avèrent être très schématiques. Dans le cadre de cette recherche nous avons cherché à modéliser les changements de températures au sein d'une charbonnière pour suivre l'évolution de la carbonisation.

Pour cela, des travaux conduits avec R. Rouaud et P. Allée au sein du Programme Collectif de Recherche « Géohistoire et géoarchéologie des territoires forestiers Limousins » trois charbonnières expérimentales ont été réalisées en septembre 2008 ; celles-ci seront plus largement évoquées par la suite dans ce chapitre. Chaque meule était équipée de six thermocouples (sondes de températures) enregistrant toutes les 10 min la température. Pour étudier l'évolution au sein des meules, les sondes ont été placées de la façon suivante : trois sur le sol, et trois autres à mi hauteur de la meule, en positionnant toujours une sonde vers la cheminée, une vers la périphérie de la meule et une troisième entre les deux premières. A partir de ces données la carbonisation peut être décomposée en quatre grandes phases (figure 31).

La première correspond à la phase d'allumage, qui présente des températures très élevées à la base de la cheminée. Le dépôt de braises produit une montée en en température très rapide, pour atteindre 800° C, et se poursuivre pendant près de trois heures en se propageant au sein de la meule.
La deuxième phase correspond aux dix heures suivantes. On trouve des températures élevées en haut de la cheminée. Cette phase correspond au début de la carbonisation.
La troisième phase correspond à une diminution des températures sur l'ensemble de la meule ; celles-ci sont comprises entre 300 et 500°C. Durant cette phase, il est possible d'observer l'avancée de la carbonisation depuis le sommet de la charbonnière vers le pied de la meule. C'est au cours de ces 24 à 40 heures de cuisson que la meule s'affaisse progressivement. Sur certaines courbes de températures obtenues sur les trois charbonnières des changements brutaux dans les températures enregistrées sont observés, ceux-ci correspondent à des ouvertures de la couverture de la charbonnière, augmentant rapidement les arrivées d'oxygène et créant ainsi des points chauds pouvant atteindre jusqu'à 600°C. Cela est particulièrement visible pour la charbonnière 3. (figure 31)
Enfin, la dernière phase de la carbonisation correspond à la diminution progressive des températures sur l'ensemble de la meule passant de près de 400°C à environ 200°C. Le

travail de carbonisation s'achève alors et si le charbonnier ne procède pas à ce moment là à la récolte du charbon, il risque de perdre l'ensemble de sa production qui continue alors à se consumer.

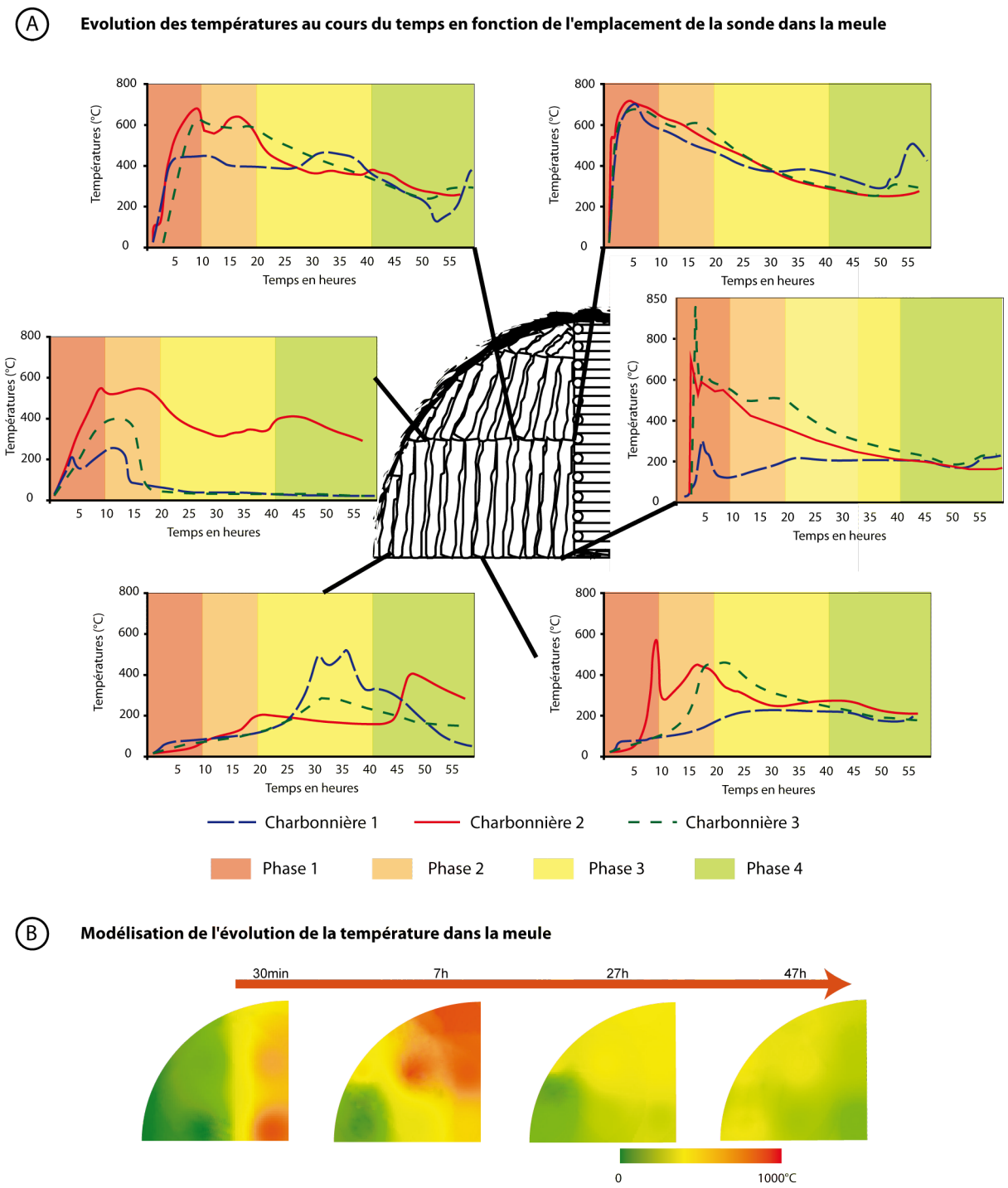


Figure 31 : Etude de l'évolution des températures au sein des meules. (A) Présentation des résultats bruts pour chaque sonde. (B) Modélisation de quatre étapes de carbonisation.

1.4. Le temps de la récolte du charbon de bois

La dernière étape dans l'activité de charbonnage correspond bien sûr au moment de la récolte du charbon de bois. L'ouverture des charbonnières est un moment important pour le charbonnier mais également pour tous ceux qui l'entourent ; c'est le moment où l'on découvre si la production est de qualité satisfaisante. Cette étape peut une fois encore être décomposée en plusieurs temps. Avant d'ouvrir la meule en entier, il convient dans un premier temps de la refroidir et ainsi de vérifier s'il reste encore des braises. Cette étape s'appelle le refroidissement. Elle est suivie par l'ouverture de la meule et de la récolte des charbons de bois proprement dite.

1.4.1. Le refroidissement de la meule

Entre les descriptions faites dans les textes du XVIIIe et ce que l'on connaît à partir des études ethnologiques et notre expérience, cette étape de refroidissement est celle qui diffère le moins. Duhamel du Monceau décrit cette phase avec une succession de gestes réalisés par trois charbonniers. « *Quand les charbonniers jugent qu'il l'est entièrement* [que le feu est éteint], *pour précipiter le refroidissement des charbons, ils les découvrent de la manière suivante. Un ouvrier emporte avec un râteau qui a de longues dents de fer, qu'ils) nomment arc, la plus grande partie de la terre qui recouvre le fourneau. Un second ouvrier qui le suit ôte avec un râble de bois, la terre sèche et pour ainsi dire, pulvérise, jusqu'à ce que la forme du charbon paraisse sans pourtant le mettre à découvert. Comme pour peu qu'il restât du feu dans le fourneau, l'embrassement se rétablirait. Un troisième ouvrier vient après celui qui manie le râble et avec une pelle, il reprend la terre qui vient d'être ôtée et il la rejette sur le fourneau. Par cette opération, ils précipitent le refroidissement du charbon, et ils ne courent point le risque de le voir se rallumer.* » (Duhamel du Monceau, 1774, p. 671). Cette description du XVIIIe siècle reste toujours d'actualité ; on voit dans les études ethnologiques, dans les témoignages de charbonniers, revenir l'importance de cette étape de refroidissement. A quelques exceptions près le procédé est similaire pour l'ensemble des carbonisations en meule. Lors de nos observations nous avons seulement constaté que le charbonnier ne réemploie pas la terre qu'il a retirée pour refroidir la meule, mais il utilise de la terre « froide » conservée autour de la plateforme, augmentant ainsi le pouvoir de refroidissement (figure 27 G).

1.4.2. L'ouverture de la meule

Une fois la température de la meule bien abaissée, les charbonniers procèdent au « tirage » du charbon de bois. « *Enfin le fourneau étant entièrement refroidi, on ôte toute la terre et on tire le charbon pour le transporter, comme nous allons l'expliquer. Il est prudent, quand on ouvre le fourneau, de le tirer que d'un côté, afin que si l'on aperçoit encore du feu, on pût interrompre le travail et remettre de la terre pour prévenir un embrassement général, ce qui est quelques fois arrivé.* » (Duhamel du Monceau, 1774 p 671). A l'aide d'un râteau avec de grandes dents, le charbonnier récolte le charbon de bois. Il est assez surprenant d'observer, à l'ouverture de la meule, que les bûches sont comme intactes, elles ont conservé leur position d'origine. Cela produit donc de très gros charbons de bois, la taille correspond presque à la taille initiale des bûches, seule une réduction de volume, due à la perte en eau, est nettement identifiable (figure 32).

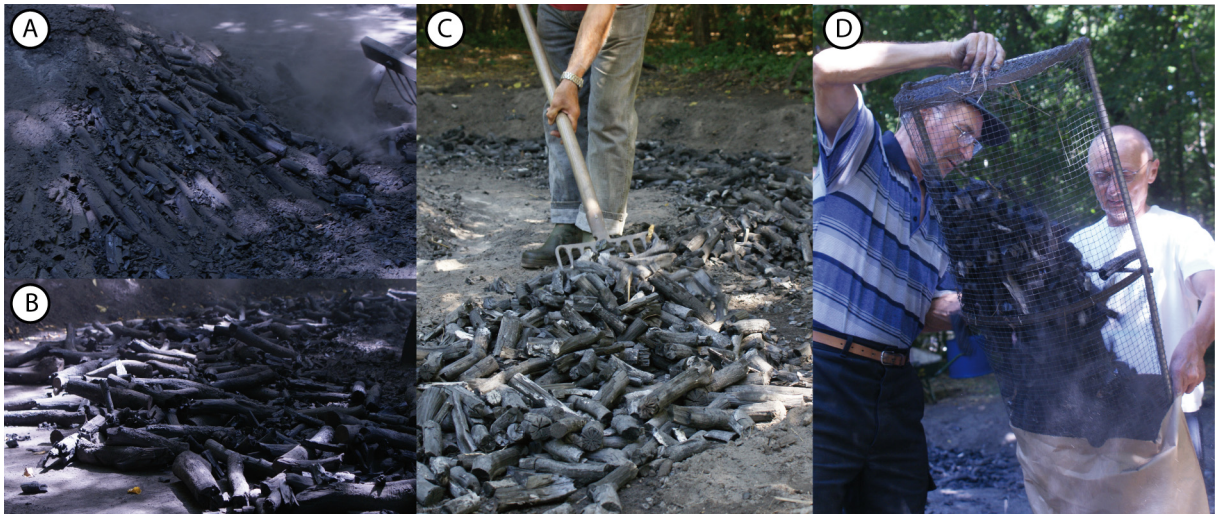


Figure 32 : Ouverture de la meule (A). Ramassage des charbons de bois (B, C, D) (Clichés S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)

Lors de l'ouverture, pour éviter que le cœur de la meule ne s'enflamme à nouveau, les charbonniers que nous avons rencontrés, procèdent à un tirage du charbon par couronnes successives. Ils récoltent le charbon le plus en périphérie de la meule, puis la recouvre à nouveau pendant quelques heures. Ce procédé est répété plusieurs fois selon la taille de la meule ; plus la meule est grande, plus le temps de refroidissement sera long.

Enfin lors de la mise en sac du charbon de bois, ce dernier est calibré ; pour cela il est tamisé (figures 27 H et 32). A l'issue de ce ramassage, il reste une fraction trop petite pour les usages industriels ; dans certaines régions, on nomme cette partie résiduelle « la

braisette ». Elle est parfois récoltée et vendue pour d'autres usages, comme les chauffages d'appoint (chaufferettes).

1.5. Des plateformes réemployées ou abandonnées

A l'issue d'une carbonisation, le devenir de la plateforme peut être multiple. Soit le charbonnier procède directement à d'autres carbonisations, soit celle-ci est abandonnée souvent en raison d'un éloignement trop important des ressources en bois. Si le charbonnier enchaîne les carbonisations sur une même plateforme, alors ce dernier procède généralement à un simple nettoyage de l'emplacement, raclant les résidus de terre et de charbon qu'il place sous forme de bourrelet tout autour de la plateforme, ceux-ci étant réemployés pour la carbonisation suivante. En revanche, si la plateforme est abandonnée, alors les processus naturels interviennent. Les macros et micro organismes enfouissent les charbons dans le sol, les successions de gel, dégel, la pluie ou encore la sécheresse finissent par fragmenter les charbons. L'abandon des aires de charbonnages peut être plus ou moins temporaire. En effet, elles peuvent être réemployées après quelques années, quelques décennies ou plus, cela peut dépendre des périodes de révolution des coupes des espaces forestiers, de la demande en charbon de bois ou encore des droits de charbonnage. Si aucun charbonnier ne revient sur les plateformes, alors celles-ci s'érodent, se fossilisent et deviennent de véritables sites archéologiques, conservant dans leurs horizons charbonneux les secrets des anciennes forêts charbonnées

Décrire l'ensemble des étapes de la carbonisation en meule nous semblait particulièrement important à développer ici pour mieux comprendre l'origine des restes archéologiques et archéobotaniques retrouvés aujourd'hui sur les anciennes plateformes de charbonnage. Les modes de carbonisation, la gestuelle des charbonniers, les processus taphonomiques vont engendrer indéniablement des déformations entre l'image du bois mis au feu et celle restituée par l'analyse archéobotanique. « *Entre la collecte du bois de feu et la lecture des diagrammes anthracologiques, s'instaurent des filtres successifs qui affectent l'image de la végétation et de ses transformations* » (Théry-Parisot, 2001, p. 31).
Maitriser au mieux l'ensemble des étapes de la carbonisation, les phénomènes de réemploi des plateformes, ainsi que les processus post-dépositionnels après abandon des plateformes est déjà un premier pas pour mieux comprendre, mieux interpréter les résultats des analyses anthracologiques que l'on peut réaliser sur les restes charbonneux.

2. Marqueurs spatiaux, temporels et botaniques pertinents pour étudier les « forêts métallurgiques »

L'activité de charbonnage a depuis longtemps marqué les paysages forestiers, transformé les sylvofaciès et a laissé de nombreux vestiges archéologiques particulièrement intéressants pour retracer l'histoire des anciennes « forêts métallurgiques » qui ont produit d'importantes quantités de charbon de bois pour approvisionner les fours de réduction ou encore les ateliers du travail du métal. Mais finalement, bien que très nombreux dans les massifs forestiers ou encore sur des versants aujourd'hui complètement dépourvus d'arbres, ces vestiges archéologiques n'ont été que tardivement étudiés, les recherches se concentrant dans un premier temps sur les restes des activités de travail du métal (Eschenlohr et Serneels, 1991 ; Pelet, 1993 ; Dunikowski et Cabboi, 1995). Sortir des sites archéologiques métallurgiques pour s'intéresser directement aux zones de production de charbon de bois a nécessité la mise en place d'une démarche un peu particulière d'abord appelée « mémoire des charbonnières » puis « anthracologie des charbonnières ». Il convient ici de rappeler brièvement l'historique de cette démarche (Métailié et Jalut, 1991 ; Bonhôte, 1992 ; Izard, 1992 ; Dubois, 1992 ; Davasse, 2000).

2.1. Sortir des sites métallurgiques pour étudier la relation entre les activités métallurgiques et la forêt, une démarche surprenante à ses débuts

2.1.1. Des sites métallurgiques aux zones de production du charbon de bois

Pendant longtemps, l'étude des « forêts métallurgiques » a été conduite sur les restes charbonneux retrouvés sur les sites d'extraction du minerai, les ateliers de production ou encore de travail du métal. Mais sur ces sites, c'est souvent l'archéométallurgie qui domine et la part des travaux consacrés à l'étude du combustible est souvent secondaire. Jusque dans les années 1990, les études étaient ponctuelles, souvent très sommaires, procédant uniquement à la détermination taxonomique de quelques charbons de bois. Après les années 1990 on note quelques études plus poussées, développant des interprétations

biogéographiques, déterminant même la période d'abattage des bois (Eschenlohr et Serneels, 1991 ; Pelet, 1993 ; Dunikowski et Cabboi, 1995 ; Dieudonné-Glad, 2010). Mais quelle que soit la précision de l'analyse sur ces sites, l'image de la forêt est biaisée ; les analyses anthracologiques reflètent en réalité une image globale de l'ensemble des forêts exploitées pour la production de métal, pouvant s'étendre parfois sur des espaces très vastes. « *Les premières études anthracologiques des grands sites de forges les plus connus ou les plus facilement repérables ont apporté peu d'informations interprétables sur la composition des forêts alentours : le charbon que l'on y retrouve provient d'une exploitation répartie sur tous les peuplements, voir d'un commerce régional. Il faut donc rechercher les sites qui sont le reflet le plus fidèle d'un prélèvement localisé : petites forges à bras itinérantes de l'Antiquité ou du Moyen Age par exemple et surtout les anciennes places de charbonnage disséminées dans tout l'espace exploité* » (Métailié, 1992 p 583). Dès lors la plateforme de charbonnage est considérée comme un objet archéologique pertinent à employer pour restituer l'histoire des massifs forestiers.

Dès 1985, les chercheurs du laboratoire Géode, UMR 5602 CNRS, ont compris l'intérêt d'étudier les plateformes de charbonnage. Sortir des sites archéologiques dits « classiques », pour étudier des structures parfois à peine décelables dans la topographie, semblait dans un premier temps incongru, mais les résultats sont sans équivoques. Ils apportent une nouvelle image des forêts charbonnées. Le repérage des plateformes permet d'envisager une étude spatiale des anciens espaces forestiers, la datation de ces vestiges donne de la profondeur à l'histoire de ces forêts et enfin l'analyse archéobotanique autorise une restitution relativement précise des sylvofaciès et de leur évolution (Métailié et Jalut, 1991 ; Métailié *et al.*, 1992 ; Izard, 1992 ; Davasse, 1992 ; Bonhôte, 1998).

Ces recherches ont conduit à différents programmes de recherches (Métailié et Jalut, 1991), de nombreuses thèses traitant des paysages forestiers sur le versant nord des Pyrénées et leurs interactions avec les activités humaines (Bonhôte, 1994 ; Verna, 1994 ; Izard, 1999 ; Davasse, 1999 ; Galop, 1998). Autour de ces thématiques de recherche, de nombreux protocoles, méthodologies ont été mis en place, ces derniers étant encore employés par la majorité des personnes travaillant sur la question des forêts charbonnées.

2.1.2. De la « mémoire des charbonnières » à « l'anthracologie des charbonnières »

Ces recherches ont d'abord privilégié l'approche spatiale pour cartographier les anciens espaces forestiers. Généralement implantées au cœur des massifs pour éviter les déplacements du bois, les plateformes de charbonnage sont d'excellents témoins de présence forestière permettant de mettre en évidence les changements dans les limites supérieures des forêts. Cette approche est alors nommée la « mémoire des charbonnières » qui restitue assez fidèlement les anciens contours des espaces forestiers (Bonhôte, 1992 ; Bonhôte et Métailié, 1992).

Rapidement, les recherches s'orientent vers une approche archéobotanique. L'analyse des charbons de bois retrouvés sur les plateformes permet d'apporter, en plus de l'information spatiale, des données botaniques permettant d'étudier l'évolution des sylvofaciès. Dès lors, on ne parle plus de « mémoire des charbonnières » mais plutôt « d'anthracologie des charbonnières » (Davasse, 2000). Etudier ces zones de concentration de charbon de bois pouvait sembler dans un premier temps bien loin des protocoles classiques de l'analyse anthracologique qui privilégient les charbons de bois dispersés dans les couches archéologiques plutôt que les zones de concentration, pour obtenir une bonne représentation paléoécologique de la végétation environnant les sites (Chabal, 1997).

Pour rendre l'analyse anthracologique de ces sites pertinente, il a fallu adapter les protocoles de prélèvement et tester la représentativité des spectres en fonction du nombre de charbons étudiés. Depuis maintenant 25 ans, les recherches conduites sur les plateformes de charbonnage se multiplient ; observations ethnologiques, expérimentations et études très poussées sur certains secteurs font aujourd'hui encore évoluer les recherches et les méthodes pour mieux appréhender les forêts charbonnées (Bonhôte, 1998 ; Davasse, 2000 ; Ludemann, 2003 ; Euba, 2008 ; Oillic, 2011 ; Allée *et al.*, 2011).

2.2. L'approche spatiale : première étape à l'étude des forêts charbonnées

Au début, les chercheurs qui s'intéressent à l'analyse des plateformes de charbonnage considèrent principalement ces vestiges archéologiques comme un marqueur spatial des anciens espaces forestiers. Les plateformes de charbonnage retrouvées en forêt ont d'abord été repérées ; ces dernières sont facilement identifiables et bien connues des forestiers et des habitués de la forêt (promeneurs, chasseurs, ramasseurs de champignons etc.) certains ayant même le souvenir de charbonniers utilisant ces replats. Leur identification permet aujourd'hui de donner de la profondeur historique à ces massifs forestiers, mettant alors en évidence le passé combustible de ces forêts à vocation industrielle ou non.

En revanche, les plateformes retrouvées hors forêts, sont plus difficile à repérer. « *A priori on imaginait bien leur présence sans en avoir la preuve* [...] *La méconnaissance des anciennes limites bioclimatiques de la forêt rend leur recherche altitudinale plus hasardeuse ; parfois il faut laisser à l'intuition le soin de guider un coup de pelle* » (Bonhôte, 1998, p. 38). Sur de nombreux versants aujourd'hui complètement ouverts on retrouve d'anciennes plateformes de charbonnage (Pyrénées, mont Lozère). La découverte de ces vestiges hors des massifs forestiers permet donc de cartographier les anciens espaces forestiers aujourd'hui disparus.

Depuis 1985, l'approche spatiale de la forêt charbonnée a finalement peu évolué. Chaque plateforme est alors cartographiée permettant à l'issue des différentes prospections de retracer l'emprise des anciennes forêts.
Dans le cadre de nos recherches, nous procédons au recensement des plateformes de charbonnage à l'aide d'un GPS. A la localisation, de nombreuses informations sont également relevées et enregistrées dans une base de données : dimension de la plateforme, état de conservation, relevé de végétation sur et autour de la plateforme, mesure de l'épaisseur de l'horizon charbonneux etc. (figure 33). Toutes ces données permettent d'envisager la mise en place des typologies, d'étudier si les tailles des plateformes diffèrent en fonction des versant ou encore en fonction de l'altitude, mais également il est envisageable d'évaluer le volume des meules érigées sur ces plateformes. De plus l'ensemble de ces informations permettent ensuite de choisir les plateformes pertinentes à prélever en vue d'une analyse anthracologique.

Figure 33 : Images de plateformes de charbonnage en forêt ou en milieu ouvert (A, C, D). Localiser chaque plateforme (B) et relever les informations concernant les vestiges archéologiques et la végétation environnante (C, E) (Cliché S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)

L'identification de ces vestiges est donc une première étape pour reconstituer les dynamiques forestières. En revanche, l'absence de plateforme de charbonnage n'est pas révélatrice d'une absence de forêt. En effet, ces vestiges sont particulièrement fragiles et peuvent être altérés par les processus érosifs ou encore par des engins mécaniques pour des exploitations forestières ou encore agricoles. Prenons deux exemples. Les plateformes situées dans des massifs forestiers peuvent être complètement détruites lors de phase de plantations généralement précédées de sous-solage très important. Dans le cas des espaces aujourd'hui ouverts, les plateformes peuvent avoir également été détruites par les activités agricoles ou encore par des phénomènes érosifs particulièrement intenses.

La destruction de ces vestiges laisse donc des vides lors du recensement des plateformes. Il est donc difficile d'associer l'absence de vestiges à une absence de charbonnage par le passé. Lors de nos prospections, les espaces sur lesquels nous ne trouvons pas de plateformes

de charbonnage sont étudiés de plus près afin d'identifier des éléments pouvant indiquer l'éventuelle destruction des anciennes plateformes.

A partir des cartographies de l'ensemble des plateformes de charbonnage il est alors envisageable de restituer les anciens contours des espaces forestiers et de repérer les changements de la limite supérieure de la forêt (Bonhôte et Métailié, 1992 ; Davasse, 1992 ; Allée *et al.*, 2011)

2.3. L'analyse anthracologique des plateformes de charbonnage : deuxième étape à l'étude des forêts charbonnées

Les quantités importantes de charbon de bois conservées sur les plateformes de charbonnage offrent un matériel d'étude particulièrement intéressant pour conduire une approche biogéographique. En effet, leur analyse permet d'identifier les essences et d'aborder la question du diamètre des bois charbonnés, ces deux informations étant particulièrement importantes pour restituer les sylvofaciès et les modes de gestion de ces espaces forestiers.

Or, comme nous venons de le voir, ces vestiges sont loin des conditions de dépôts retrouvés sur les sites d'habitats par exemple. « L'anthracologie des charbonnières » pose des questions spécifiques qui nécessitent de mettre en place des protocoles d'échantillonnage particuliers afin d'obtenir une information botanique de qualité. L'étude des plateformes de charbonnage permet de restituer une image très précise, très locale, de la végétation située à proximité de la plateforme. Comme il a été expliqué précédemment, le charbonnier prélève, dans la majorité des cas, son bois à proximité de la plateforme entre 50 et 150 m (Davasse, 2000). Lorsque les ressources sont épuisées et sont trop éloignées de la plateforme il est alors plus intéressant de se déplacer vers une autre plateforme. En multipliant les analyses sur de nombreuses plateformes de charbonnage il est envisageable de restituer l'ensemble de la forêt charbonnée, à l'échelle du « site charbonné » (Davasse, 2000).

Du terrain au laboratoire, la démarche anthracologique conduite sur les restes charbonneux provenant de plateformes de charbonnage nécessite des protocoles spécifiques. Il nous semble donc important de présenter rapidement l'évolution des modes opératoires pour échantillonner les plateformes de charbonnage.

2.3.1. Etudier les sylvofaciès charbonnés, la nécessité d'adapter les protocoles de prélèvements

En 25 ans de recherche, les protocoles de prélèvements ont radicalement changé, chaque équipe les faisant évoluer, les adaptant à sa problématique.

a) Les protocoles de prélèvements, une nette évolution en 25 ans de recherches

Dans un premier temps, considérées principalement comme un marqueur spatial, les plateformes de charbonnage font l'objet de prélèvements à la main sur la totalité de l'horizon (Bonhôte, 1992). Par ce principe, seuls les gros charbons ont fait l'objet d'une analyse taxonomique. De plus, avec ce procédé, il était impossible de prendre en considération la possible conservation de la stratigraphie au sein de l'horizon charbonneux. Les charbons provenant du fond de l'horizon étaient mélangés avec ceux de surface.

Dans un second temps, les plateformes de charbonnage font l'objet d'un double prélèvement (Davasse, 1992). Les charbons provenant de la base de l'horizon charbonneux sont séparés des charbons de surface. La séparation de l'horizon charbonneux permet ainsi de montrer s'il existe des différences de végétation autorisant alors une vision dynamique des massifs charbonnés. Mais, une fois encore, le prélèvement reste manuel et le nombre de charbons analysés est assez réduit. Même si cette méthode permet d'apporter des informations très rapides sur la végétation charbonnée, mais l'analyse de charbons uniquement prélevés à la main est fortement déconseillée sur les sites archéologiques car c'est un facteur de sélection des essences principales et donc de sous représentation des essences secondaires (Badal-Garcia, 1992 ; Chabal, 1992).

Dans un troisième temps, les modes de prélèvement changent radicalement, passant d'un simple carottage à la tarière à de véritables fouilles extensibles ou des sondages de grandes envergures des plateformes de charbonnage. L'implantant d'un carroyage sur la plateforme permet de fouiller celle-ci secteur par secteur, localisant précisément les prélèvements. A l'image des sites archéologiques plus classiques, les prélèvements sont réalisés par décapages successifs de quelques centimètres. Cette méthodologie n'a été appliquée que sur un petit nombre de charbonnières ; on en retrouve quelques unes dans les

Pyrénées (Dubois, 1991 ; Davasse, 2000), en Languedoc Roussillon (Fabre, 1996), en Lozère (Allée et Paradis, 2007) en Montagne Noire (Pouyet, 2009) ou encore en Lorraine (Marque, 2007). Les résultats de ces fouilles complètes sont assez mitigés. En effet, la mise en évidence de stratigraphie au sein de l'horizon charbonneux est relativement rare. Finalement ce sont les résultats anthracologiques qui apportent le plus d'informations. L'étude réalisée par R. Marque (2007) montre notamment une différence des spectres anthracologiques entre le centre et la périphérie de la meule ; comme si l'emploi de bois différents en fonction de l'emplacement dans la meule avait été conservé. L. Fabre avait déjà identifié cela dans le cadre d'une démarche expérimentale, mais il considérait que les processus taphonomiques conduiraient à homogénéiser l'horizon charbonneux sur l'ensemble de la plateforme. Pour obtenir un échantillonnage le plus représentatif des bois mis dans les meules, L. Fabre privilégie un prélèvement situé à mi chemin entre le centre et la périphérie de la plateforme, zone considérée comme étant plus mélangée et donc plus représentative.
Finalement, même si l'on retrouve sur certaines plateformes des différences dans les assemblages taxonomiques au sein d'une même plateforme, cela relève plutôt du fait anecdotique, n'apportant que peu d'information sur la physionomie des massifs forestiers. Ces méthodes de fouilles, adaptées à l'anthracologie, réalisées sur les sites plus classiques sont bien trop lourdes à mettre en œuvre et limitent ainsi le nombre de plateformes échantillonné.

C'est pourquoi B. Davasse privilégie une nouvelle approche : « *Le prélèvement des charbons de bois s'effectue de la manière suivante : au point le plus profond de la charbonnière, un carré d'un quart de mètre carré est tracé, après enlèvement de l'horizon supérieur, stérile, le sédiment charbonneux est prélevé par décapages successifs de 5 cm, jusqu'à l'horizon inférieur marqué par un changement net de couleur* » (Davasse, 1992). Ce protocole de prélèvement simple à mettre en œuvre permet de multiplier les prélèvements. De plus l'échantillonnage de deux niveaux au sein de l'horizon charbonneux permet d'identifier sur certaines plateformes des différences dans les spectres anthracologiques entre la base et le sommet de l'horizon charbonneux, mettant ainsi en évidence différentes phases de charbonnage permettant de reconstituer les dynamiques de végétation sur une période plus ou moins longue.

L'objectif de cette approche était à la fois d'avoir une image dynamique de la végétation dans le temps tout en appliquant un prélèvement relativement simple à mettre en place et

facilement reproductible sur un grand nombre de plateformes.
Cette méthode s'est très largement généralisée et la plupart des personnes travaillant sur les vestiges des activités de charbonnage l'utilise encore, faisant parfois seulement varier la taille de la fenêtre de prélèvement ou encore l'épaisseur des décapages successifs (Paradis, 2007 ; Allée et Paradis, 2007 ; Euba, 2008 ; Oillic, 2011).

Dans les années 2000, T. Ludemann et O. Nelle, développent un nouveau protocole. Pour obtenir une image moyenne des bois charbonnés sur la plateforme, ces derniers récoltent à la main les charbons supérieurs à 0,5 cm^3 au sein de cinq petites fosses distribuées uniformément sur l'ensemble de la plateforme. Dans chacune des fosses 20 à 25 charbons sont ramassés, mais pour l'analyse l'ensemble des charbons sont associés permettant ainsi d'obtenir environ 100 charbons par couche pour chaque charbonnière, cela permet d'atténuer les disparités spatiales de la répartition des essences au sein de la plateforme de charbonnage (Nelle, 2002 ; Ludemann, 2010).

Dans le cadre de cette recherche nous avons développé un protocole de prélèvement simple à mettre en œuvre et facilement reproductible sur un grand nombre de plateformes de charbonnage. Pour cela nous nous sommes appuyés sur les observations de L. Fabre et de B. Davasse.

B. Davasse propose un prélèvement sur une fenêtre de prélèvement d'environ 25 cm de côté à l'emplacement le plus épais de la plateforme, puis le sédiment est récolté par décapages successifs de 5 cm (Davasse, 1992 ; Davasse, 2000). L. Fabre quant à lui évoque un emplacement légèrement différent pour obtenir la meilleure représentation des bois charbonnés, situé à mi-chemin entre le centre de la meule et la périphérie. Cette zone semble avoir fait l'objet de brassage plus important permettant ainsi un mélange des bois situés au cœur de la meule avec ceux situés à la périphérie (Fabre et Gervet 1992 ; Fabre, 1996).

C'est donc en ouvrant des fenêtres de prélèvements d'une vingtaine de centimètres de côté à mi-chemin entre le centre et la périphérie de la plateforme que nous réalisons nos prélèvements, tout en échantillonnant par décapage successif de quelques centimètres d'épaisseur, tout dépend de l'épaisseur de l'horizon charbonneux. Lorsque les conditions le permettent, le sédiment est tamisé à la maille de 2 mm, ceci permettant ainsi d'évaluer la

richesse en charbon des prélèvements ; si celle-ci est évaluée trop faible, alors la fenêtre de prélèvement est élargie.

b) Du terrain au laboratoire

Dans le cadre de ce travail le sédiment est placé dans un seau rempli d'eau régulièrement remuée permettant ainsi au charbon de flotter à la surface. L'eau et les charbons sont ensuite versés dans une colonne de tamis de 4 et 2 mm pour récupérer uniquement les charbons. Ce processus est répété jusqu'à ce que l'eau devienne claire et que la totalité des charbons soit extraite des sédiments. Ce procédé, non agressif, permet de bien séparer la fraction charbonneuse du sable et des cailloux souvent abondants dans les prélèvements.
Par la suite les charbons sont mis à sécher à l'air libre avant d'être analysés.

2.3.2. Retrouver les essences charbonnées

a) Principes et méthodes de la détermination taxonomique

Lorsque les charbons sont secs, l'analyse anthracologique peut alors être réalisée. La détermination taxonomique des charbons repose sur la parfaite conservation des critères anatomiques du bois à l'issue de la carbonisation. Le diagnostic s'effectue sous microscope épiscopique en observant, sur les trois plans de coupe, les critères anatomiques propres à chaque essence (figure 34) :

- coupe transversale, perpendiculaire à l'axe de la tige
- coupe radiale, parallèle aux rayons ligneux
- coupe tangentielle : perpendiculaire aux rayons.

Le bois est un tissu soutien permettant les échanges organominéraux au sein des arbres. Lors de l'étude microscopique de l'organisation cellulaire on peut observer des différences entre les bois de feuillus et les conifères. En effet, le bois est composé de fibres, de vaisseaux et de parenchymes chez les feuillus alors qu'il est composé de trachéides et de parenchymes chez les conifères. L'agencement des cellules pour chaque espèce permet dans la majorité des cas de les différencier. La morphologie des pores, des perforations, et la composition des rayons ligneux sont autant d'indicateurs pour effectuer la détermination. Des atlas

xylologiques contenant les clés de détermination, des dessins et des photographies (Jacquiot *et al.*, 1973 ; Schweingruber, 1978 ; Schweingruber *et al.*, 2011 ; Vernet *et al.*, 2001) ainsi que des collections de références nous guident, étape par étape, pour identifier l'essence de chaque charbon. Mais la précision de la diagnose dépend de la possibilité de distinguer anatomiquement les bois de différentes espèces et de la conservation des charbons.
Il arrive en effet que deux espèces soient difficilement différenciables, la détermination s'arrête alors au genre ou à la famille. Les critères de détermination sont encore affinés pour mieux différencier certaines espèces souvent regroupées dans des taxons « valises » regroupant des taxons difficiles à discriminer.

De plus, l'analyse peut également être compliquée par des déformations trop importantes des structures anatomiques des bois du fait d'une carbonisation trop intense. Certains charbons présentent des surfaces luisantes, les structures anatomiques sont comme « fondues », ces charbons sont dits « vitrifiés » (Théry-Parisot, 2001 ; Braadbaart et Poole, 2008 ; Vaschalde, 2011 ; Oillic, 2011). Lorsque la vitrification est trop importante, la détermination est rendue impossible, ces charbons alors sont classés dans la catégorie des « indéterminables ».

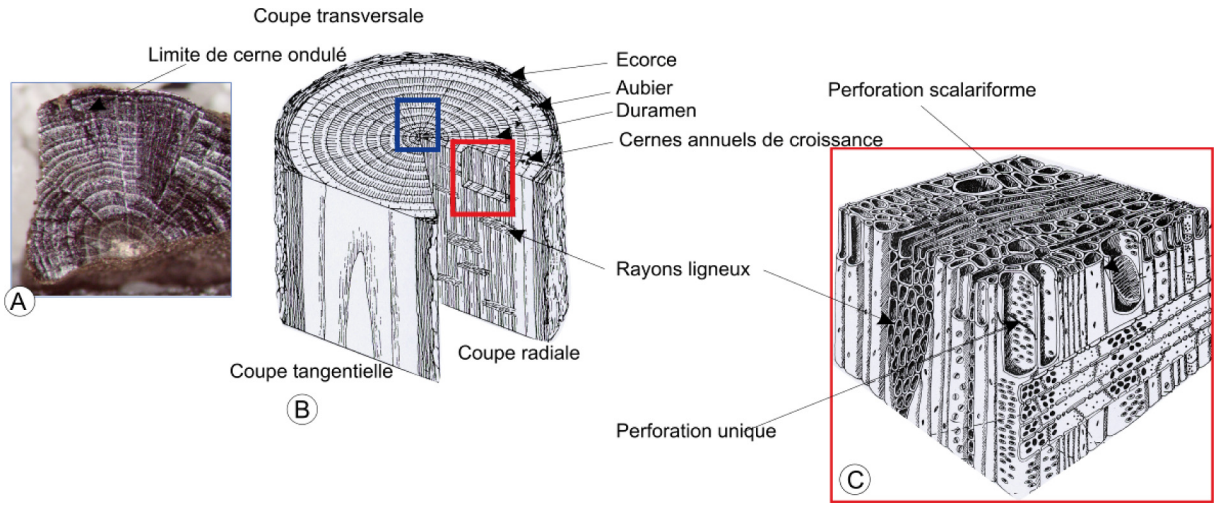


Figure 34 : Structure anatomique du bois. A : photographie de la coupe transversale d'un hêtre avec les cernes ondulés. B : vue macroscopique (Schweingruber, 1978) et C : vue microscopique

b) De la détermination aux spectres anthracologiques

Les résultats de l'analyse taxonomique sont par la suite représentés par des diagrammes de fréquences appelés spectres anthracologiques. Ces spectres peuvent être construits

de différentes façons, en prenant en considération soit la masse, le nombre ou encore le volume. Les différentes études ont montré que la fréquence exprimée en nombre ou en masse de charbons apportait des résultats similaires (Krauss-Marguet, 1981 - Chabal, 1992, 1994, 1997) - quant aux volumes, peu d'études ont été réalisées à ce jour. Le nombre étant plus facile à manipuler, il est plus généralement employé.

Travaillant sur les vestiges d'activités humaines, la question de la représentativité des spectres doit être posée. Sélection des bois pour leurs essences ou leurs diamètres, différents contextes de carbonisation, dispersion des charbons, processus taphonomiques, prélèvements des charbons par l'anthracologue, fragmentation lors du tamisage sont autant de filtres pouvant conduire à une déformation de la réalité paléoécologique. L'anthracologue doit s'attacher à restituer la réalité des bois mis au feu ; si ces derniers sont le résultat d'une sélection, alors il sera bien sûr impossible de retrouver l'ensemble de la végétation arborée présente autour du site. En revanche, il est possible de travailler sur la pratique, sur les modes de gestion, et c'est cela qui nous intéresse plus particulièrement dans le cadre de l'étude des forêts charbonnées et donc des « forêts métallurgiques ». Il convient de tester si les charbons de bois déterminés sur les plateformes de charbonnage sont représentatifs de l'échantillon dont ils proviennent. Pour cela, certains auteurs proposent de construire au cours de la détermination taxonomique des courbes « effort-rendement ». Celles-ci représentent le rang des essences identifiées en fonction du nombre de charbons étudiés (figure 35). Les études menées par L. Chabal montrent qu'en moyenne, sur site archéologique, il faut analyser entre 250 et 300 fragments pour obtenir une stabilisation de la courbe « effort/ rendement » (Chabal,1997).

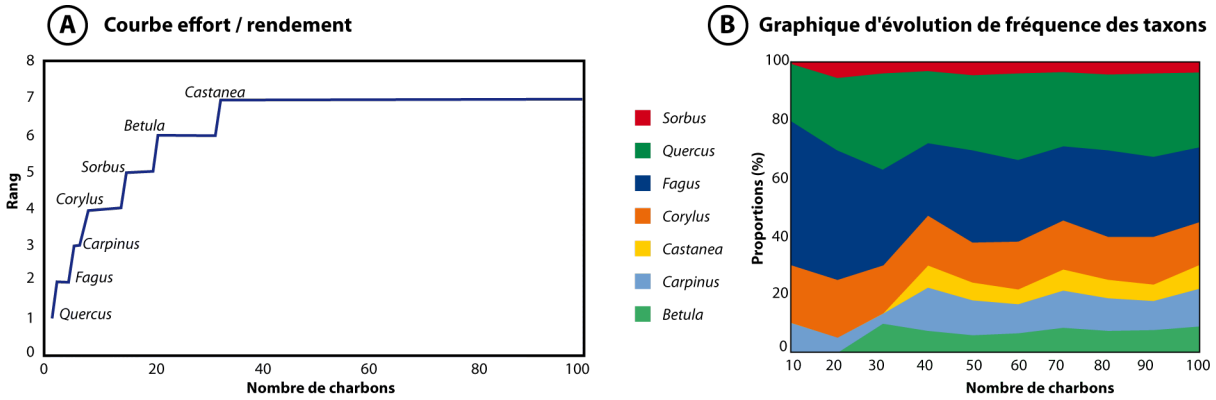


Figure 35 : Exemple d'une courbe « effort/rendement » (A) et d'un graphique d'évolution de fréquence (B)

Le contexte des plateformes de charbonnage est particulier, la diversité taxonomique

est peu élevée. B. Davasse démontre dans ses travaux que la stabilisation de la courbe « effort/rendement » est beaucoup plus rapide ; avec moins de 100 charbons les proportions de chaque essence n'évoluent plus malgré l'apparition d'un fragment de charbon d'une nouvelle essence.

Lors de nos recherches, pour chaque échantillon, nous testons la représentativité des spectres en évaluant si le nombre optimal de charbons a été atteint. Pour cela en plus des courbes « effort/rendement » nous construisons un graphique représentant l'évolution des fréquences en fonction du nombre de charbons (figure 35 B). A partir de ces résultats il est alors possible de restituer une image des essences charbonnées, et donc une image très précise de la végétation présente dans un rayon d'une centaine de mètres autour de la plateforme ce qui est particulièrement pertinent pour l'étude des anciens espaces forestiers.

2.3.3. Retrouver le diamètre des bois charbonnés

Les restitutions paléoécologiques issues de la détermination taxonomique permettent de représenter les proportions des différentes essences charbonnées. En revanche, ces spectres anthracologiques ne permettent pas d'approcher les modes de gestion des forêts. Les bois ramassés ou encore coupés étaient-ils de petits, de moyens ou de gros diamètres ? Le diamètre des bois joue probablement un rôle au moins aussi important que l'essence dans le choix des bois ; il doit être adapté au type d'usage. Cette question est primordiale pour étudier les modes de gestion des « forêts métallurgiques », pour comprendre comment les métallurgistes ont géré les ressources en bois pour toujours fournir le combustible nécessaire au fonctionnement des fours.

Nous l'avons vu précédemment, l'analyse des textes, les études ethnologiques et même les expérimentations ne permettent pas de démontrer que pour toutes les périodes et pour toutes les régions, les charbonniers privilégiaient un type de bois plutôt qu'un autre. Bois de petits et de gros diamètres semblent avoir été employés pour produire du charbon de bois. Il est donc important de pouvoir aborder la question du diamètre des bois par d'autres indicateurs. Une fois encore, les résidus conservés dans les plateformes de charbonnage s'avèrent être d'excellents objets d'étude, voire les plus propices pour conduire

une approche dendro-anthracologique. Pourtant, à ce jour, cette approche reste encore peu développée sur les contextes de charbonnage. On connaît seulement quelques études (Hillebrecht, 1982 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Nelle, 2002 ; Ludemann, 2006, 2008 ; Oillic, 2011; Euba-Rementeria et Allée, 2009). Cette démarche est plus couramment appliquée aux sites archéologiques plus classiques, notamment aux sites d'habitats (Marguerie, 1992 ; Marguerie et Hunot, 2007 ; Dufraisse, 2002 ; Chrzavzez, 2006 ; Théry-Parisot *et al.*, 2011 ; Henry, 2011).

Depuis les années 1970, les anthracologues et les dendrologues proposent des outils permettant d'évaluer le diamètre des bois à partir de l'observation de la coupe transversale de charbon de bois ou de section de bois (Willerding, 1971 ; Schweingruber, 1978 ; Marguerie, 1992 ; Dufraisse, 2002, 2006 ; Marguerie et Hunot, 2007 ; Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Ludemann, 2002). Ces outils ont grandement évolué, et la manière d'aborder la question du diamètre des bois a également radicalement changé depuis près de 40 ans.

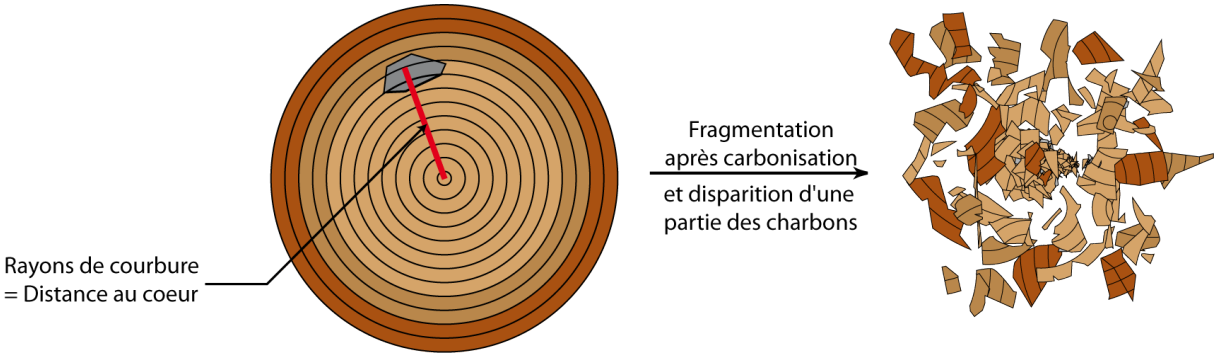


Figure 36 : La carbonisation conduit à une fragmentation des bûches et donc à la formation de charbons ayant des rayons de courbure variés

Initialement l'analyse portait uniquement sur l'estimation de la courbure des cernes. Une simple estimation visuelle, avec ou sans l'aide de cibles graduées imprimées sur transparent, permettait d'obtenir une estimation de la distance du charbon ou de la section de bois par rapport au cœur (Willerding, 1971 ; Schweingruber, 1978 ; Hillebrecht, 1982 ; Marguerie, 1992 ; Marguerie et Hunot, 2007). Jusque dans les années 2000, seules ces estimations étaient employées pour restituer le diamètre des bois. Si cela fonctionne pour les bois et les charbons de bois pour lesquels l'écorce est encore présente, en revanche, en l'absence d'écorce l'estimation faite ne peut pas être assimilée au diamètre des bois. En effet, l'estimation de la distance par rapport au cœur du bois de chaque charbon (autrement appelé rayon de courbure) (figure 36) n'est qu'une étape intermédiaire à la restitution du diamètre des bois.

A. Dufraisse explique bien la complexité de l'étude du diamètre des bois dans le cadre de sa thèse. « *Deux interprétations sont possibles à partir de la mesure du rayon de courbure du cerne. Considérons une bûche de diamètre connu par exemple 15 cm. Après carbonisation l'échantillon présentera un ensemble de charbons de bois aux rayons de courbure divers et variés, correspondant à des diamètres compris entre 1 et 15 cm :*
- soit seul le plus gros diamètre mesuré est pris en compte, mais en contexte archéologique cette application est très délicate car il faudrait connaître le nombre de bûches initialement mises au feu. Les fragments qui présentent le dernier cerne (avec ou sans écorce) peuvent cependant être pris en compte lorsqu'ils sont un certain nombre car ils indiquent les maximums observés dans les calibres ;
- soit tous les diamètres mesurés sont pris en compte. La valeur lue indique alors que le fragment analysé se trouve à tant de centimètres du cœur. En aucun cas, l'ensemble des valeurs mesurées sur un échantillon n'exprimera les proportions de calibre mis au feu. » (Dufraisse, 2002 p 111).

La fragmentation de la bûche en une multitude de fragments de charbons va donc conduire à retrouver toute une gamme de diamètres intermédiaires (figure 36), ainsi qu'à une perte de la majorité des charbons de bois, certains sont réduits en cendre, d'autres réduits en poussière sous les phénomènes de compaction, d'autres encore sont employés pour d'autres usages, ce qui est principalement le cas dans les contextes de charbonnage. L'estimation du rayon de courbure sur les charbons est donc loin d'être suffisante pour approcher la question du diamètre des bois. Certains auteurs ont donc réfléchi à ce problème et ont proposé de véritables solutions pour restituer le diamètre des bois brûlés. Pour cela, ils ont mis en place des modèles mathématiques ou utilisent des paramètres statistiques pour proposer une image des bois exploités (Dufraisse, 2002, 2006 ; Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002).

Retrouver la physionomie des forêts charbonnées et leur mode de gestion nécessite donc, en plus de la détermination taxonomique des charbons de bois, deux étapes d'analyse pour retrouver le diamètre des bois :

1- mesurer le rayon de courbure sur les charbons de bois prélevés sur les plateformes de charbonnage
2- retrouver le diamètre des bois par différents calculs mathématiques.

a) Retrouver la position du charbon par rapport au cœur du bois : mesure du rayon de courbure

La première étape dans la restitution du diamètre des bois brûlés consiste donc à évaluer ou à mesurer la position du charbon par rapport au cœur du bois, ce que l'on appelle la mesure du rayon de courbure.

Il existe deux grandes méthodes pour mesurer la distance d'un cerne visible, que ce soit sur une section de bois ou sur un charbon de bois :

- soit on s'appuie principalement sur la morphologie des cernes
- soit on s'appuie principalement sur les rayons ligneux du bois.

Le mot principalement prend ici tout son sens car, quelle que soit la méthode employée, en regardant la section de bois ou de charbon, on observe à la fois la morphologie des cernes ainsi que les rayons ligneux, l'un influençant forcément l'autre visuellement. Lors des estimations ou de la mesure du rayon de courbure, l'opérateur s'appuie généralement sur l'un ou l'autre des paramètres en priorité.

Si l'on reprend par ordre chronologique les manières de procéder pour estimer le rayon de courbure, cela commence avec l'utilisation d'une cible graduée (Willerding, 1971). Cette cible, placée sur le fragment de charbon, permet de comparer la courbure du cerne avec des cercles parfaits gradués (figure 37). Employées à la fois par les anthracologues et les dendrologues, il existe de nombreuses cibles graduées, toutes variant en fonction des chercheurs (Hillebrecht, 1982 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Dufraisse, 2002).

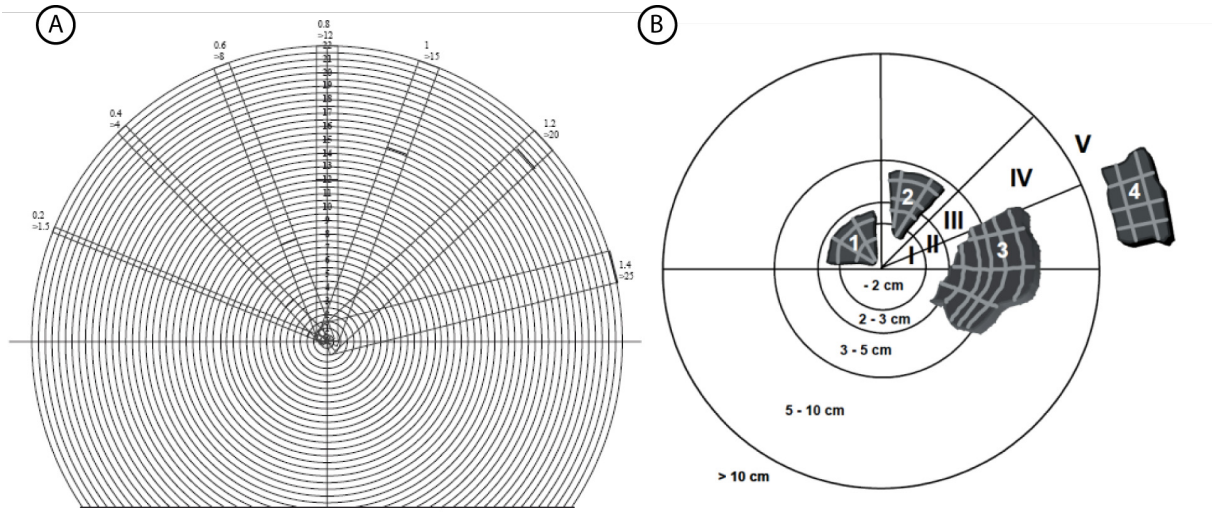


Figure 37 : Exemple de cible graduée. A : (Dufraisse, 2002), B : (Nelle, 2002)

Dans les années 1980, quelques dendrologues proposent de nouvelles méthodes pour calculer ce qu'ils appellent le rayon manquant. La première propose de s'appuyer sur des formules géométriques utilisant la corde et la hauteur entre la corde et l'arc de cercle que représente le cerne étudié (Duncan, 1989) (figure 38 A). La seconde est plus simple à mettre en œuvre, chaque rayon est prolongé sur un transparent placé sur la section de bois, ces derniers sont prolongés jusqu'à leur point de rencontre (Rozas, 2003) (figure 38 B). Ces deux méthodes sont finalement difficilement exploitables sur des fragments de charbons car elles nécessitent des sections particulièrement larges ce qui est rarement le cas dans les études anthracologiques.

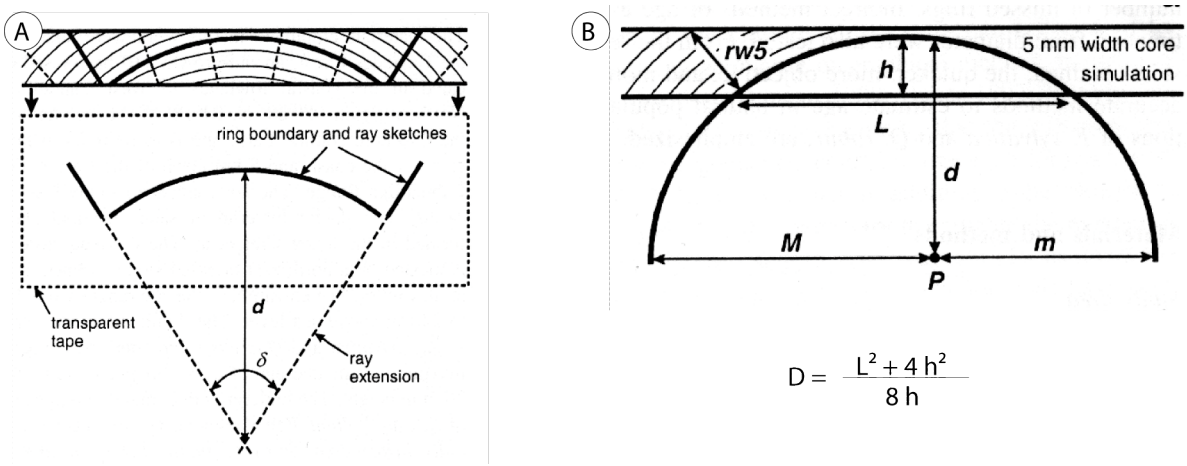
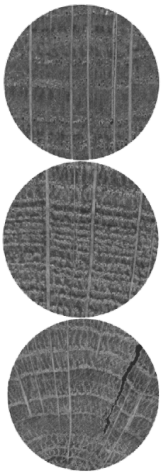


Figure 38 : Méthodes de mesure du rayon manquant. (A) Méthode mise au point par Rozas (2003) et (B) Méthode employée par Duncan (1989)

Dans les années 1990, Marguerie propose une autre méthode, s'appuyant sur une observation de la courbure des cernes ainsi que sur l'angle entre les rayons ligneux. Il établit ainsi trois classes de courbures de cernes pour lesquelles il fait correspondre une partie d'un arbre (Marguerie, 1992 - Marguerie et Hunot, 2007) (figure 39).



A : des cernes rectilignes, (les rayons sont quasiment parallèles) correspondent à des bois de gros calibres (troncs et grosses branches)

B : des cernes de courbure intermédiaire correspondent à des calibres de bois moyens (branches et petits troncs)

C : des cernes très courbes correspondent à des petits calibres de bois (brindilles et branchelles)

Figure 39 : Classes de rayons de courbure (Marguerie et Hunot, 2007)

La mesure du rayon de courbure a, depuis quelques années, beaucoup évoluée. En effet, avec la multiplication des appareils photos et des caméras fixés sur les loupes binoculaires et les microscopes, les sections de bois ou les charbons de bois peuvent désormais être traités à l'aide d'analyseurs d'images.

J. Chrzavzez est la première à employer un analyseur d'images pour réaliser des mesures de rayon de courbure sur des charbons de bois. Les premiers essais ont été réalisés à l'aide du logiciel « Image Pro Plus » avec l'outil « cercle » (Chrzavzez, 2006). En plaçant quelques points le long de la limite de cerne, le logiciel calcule automatiquement le rayon et le diamètre correspondant à l'arc de cercle. L'utilisation de « l'outil cercle » pour mesurer le rayon de courbure, revient en quelque sorte à automatiser l'utilisation de la cible, puisque la mesure est réalisée directement à partir de la morphologie des cernes. Cette méthode est très facile à mettre en place et prend peu de temps, cependant, l'ondulation des cernes de croissance peut être un problème pour la qualité de la mesure, nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre 4.

Afin de s'affranchir des déformations de la morphologie des cernes, dans le cadre de cette étude nous avons développé trois méthodes de mesure s'appuyant sur les rayons ligneux (Paradis-Grenouillet *et al.*, sous presse). Ces méthodes de mesure utilisent des formules géométriques appliquées à des triangles. L'une est basée sur le théorème de Thalès et les deux autres s'appuient sur des formules de trigonométrie. Nous ne développerons pas ici le principe de ces méthodes de mesure, celles-ci feront l'objet d'une étude plus détaillée dans le cadre du chapitre 4.

b) Du rayon de courbure au diamètre des bois : la nécessité d'employer des modèles mathématiques

La mesure du rayon de courbure ne permet pas à elle seule de retrouver le diamètre des bois brûlés. Il est nécessaire pour cela de développer des méthodologies permettant, à partir de la mesure du rayon de courbure réalisée sur l'ensemble d'un corpus anthracologique, de proposer une image du diamètre des bois exploités.

A ce jour, nous comptons deux façons d'aborder la question du diamètre des bois, toutes deux développées dans le courant des années 2000.

La première, développée par O. Nelle et T. Ludemann, est particulièrement intéressante car elle s'applique directement au contexte de charbonnage (Ludemann et Nelle 2002 ; Nelle, 2002 ; Ludemann 2006, 2008). Les auteurs proposent pour restituer le diamètre des bois, de calculer dans un premier temps un diamètre moyen. Pour cela ils calculent une moyenne pondérée à partir de l'ensemble des estimations de rayons de courbure réalisées. Mais la seule utilisation du diamètre moyen ne permet pas de restituer la composition en diamètre des bois employés, il est en effet impossible alors de différencier une utilisation uniquement de bois de diamètre moyen d'un mélange de bois de petits et de gros diamètres.
Pour tenter de restituer l'image des bois charbonnés, les auteurs proposent également de comparer les proportions obtenues par classe de diamètres à quatre histogrammes de références établies à partir de contextes actuels, en l'occurrence des charbonnières contemporaines.

Le second modèle, bien qu'il n'ait pas pour vocation première d'étudier les plateformes de charbonnage, est intéressant à présenter dans le cadre de ce travail. En effet, contrairement au précédent, il peut s'appliquer sur n'importe quel contexte archéologique, puisqu'il s'appuie sur un modèle mathématique et non pas sur des cas spécifiques. De plus, ce dernier est le seul à prendre en considération la fragmentation des bûches à l'issue de la carbonisation. Ce modèle mathématique calcule la proportion de volume par classe de cylindre creux pour différentes catégories de diamètre, ce qui permet ainsi de les comparer aux données obtenues par l'analyse dendro-anthracologique pour restituer l'image du diamètre des bois brûlés.

Depuis 2008, les approches concernant la mesure du diamètre des bois se sont largement généralisées à la majorité des équipes de recherches. Cependant, ces méthodes nécessitent encore d'être approfondies, testées sur des contextes expérimentaux variés : foyers ouverts, foyers fermés. Les foyers ouverts où la majorité des bois est réduite en cendres sont très différents des foyers fermés comme les charbonnières qui offrent d'importantes quantités de charbon de bois généralement de grande taille. D'autre part les déformations induites dans ces contextes semblent également varier de façon importante. En effet, si la perte au feu est importante dans les foyers domestiques, elle est beaucoup plus réduite dans les contextes de charbonnage. Les modèles correctifs lors des interprétations doivent donc être adaptés à chaque type de contextes archéologiques.

Nous ne développons pas plus ici ces modes de traitement car il nécessite une présentation plus approfondie s'appuyant sur des exemples concrets ; cela fera l'objet d'une étude plus détaillée dans le cadre du chapitre 5 portant principalement sur les protocoles de restitution du diamètre des bois.

2.4. La datation des plateformes de charbonnage : élément pour une étude diachronique

Au delà de l'information spatiale et botanique, les plateformes de charbonnage permettent également d'envisager une démarche temporelle et diachronique. Ces sites archéologiques ont vu, pour certains, passer des générations de charbonniers, ces derniers vivant généralement à proximité des plateformes. Ils travaillent, se nourrissent, dorment sur ces sites, employant des objets de la vie courante, qui peuvent laisser de nombreux artefacts si précieux pour les archéologues. Mais finalement rares sont les objets datant retrouvés sur ou à proximité des plateformes. Fabre évoque la découverte de quelques tessons de céramique à proximité des plateformes et parfois même au sein même de l'horizon charbonneux, mais ces artefacts ne sont finalement rencontrés que lors de fouille extensive de l'ensemble de la plateforme (Fabre, 1996). Le prélèvement de charbon de bois uniquement au sein d'une fenêtre de prélèvement ne permet pas d'obtenir cette vision générale et la probabilité de retrouver des éléments datant, comme les céramiques, est beaucoup plus réduite.

Sans matériel archéologique datant, il faut donc recourir à d'autres méthodes de datation pour replacer ces activités dans le temps. Les importantes concentrations de charbon de bois, résidus organiques particulièrement riches en carbone, permettent de réaliser des datations par la méthode du carbone 14. En dosant la quantité de carbone 14 dans l'échantillon, il est possible de définir la date de la mort des tissus ligneux
Ainsi pour obtenir la date la plus précise possible, ce sont généralement des fragments d'écorce, ou des brindilles qui sont datés. En effet, les écorces ou les brindilles présentent uniquement quelques cernes de croissance, ayant ainsi fixé uniquement la teneur en carbone 14 de l'atmosphère de l'année de l'abattage du bois, contrairement à des charbons provenant du cœur du bois qui eux contiennent une teneur en carbone 14 différente. En effet, ces cellules ont non seulement fixé la composition en carbone 14 de l'atmosphère correspondant au début de croissance de l'arbre, mais à cela s'ajoute une désintégration

plus précoce. A la mort des cellules, le carbone 14 a amorcé sa décroissance radioactive, réduisant progressivement la teneur en carbone 14.
Cette méthode permet ainsi de dater assez facilement n'importe quel horizon dès qu'il y a quelques milligrammes de matière riche en carbone ; les plateformes de charbonnage riches en charbon de bois ne posent donc pas de problème pour obtenir ce genre de matériel.

Ces datations permettent ainsi de donner une dimension temporelle à l'étude des forêts charbonnée. Rapidement employée à l'étude des plateformes de charbonnage, la datation au carbone 14 permet d'identifier des phases d'activité de charbonnage avec dans certains cas des réemplois de même plateforme à différentes époques historiques (Métailié et Jalut, 1991 ; Davasse, 2000).

Les plateformes de charbonnage, riches en charbon de bois, permettent de réaliser facilement des datations, mais finalement la façon dont elles sont construites et réemployées peut parfois être problématique pour étudier l'histoire des forêts charbonnée sur la longue durée. En effet, les emplacements sont utilisés par des générations de charbonniers qui se succèdent, il arrive parfois même que des plateformes antiques soient réemployées à l'époque médiévale (Davasse, 2000). Cette réutilisation engendre forcement un mélange au sein des horizons charbonneux. Nous l'avons vu précédemment, en s'installant sur une plateforme le charbonnier nettoie l'emplacement, racle parfois la couche charbonneuse pour l'utiliser pour couvrir sa meule. Les charbons les plus anciens sont alors mélangés avec les plus récents ce qui conduit indéniablement à une dilution des restes les plus anciens.

Dans le cadre de nos recherches, nous datons systématiquement un charbon provenant du prélèvement le plus profond et un de surface. Dans certains cas il est possible à travers la datation de mettre en évidence une utilisation sur la longue durée de la plateforme, mais on retrouve également des plateformes ou malgré un horizon charbonneux épais on ne puisse pas différencier les dates ; nous aurons l'occasion d'y revenir dans le chapitre 6 avec la présentation des résultats obtenus sur les charbonnières du mont Lozère.

La différenciation des date entre deux niveaux de prélèvement peut s'expliquer de deux manières ; soit l'horizon est parfaitement homogénéisé, de ce fait l'ensemble des charbons sont contemporains, soit cela s'explique par un biais analytique lié aux marges

d'erreur associées à la calibration de la date. En effet, à l'issue de la datation au carbone 14, il est nécessaire de calibrer les dates proposées. Cette calibration consiste à comparer les teneurs en carbone 14 de l'échantillon à une courbe de calibration étalonnée sur des sections de bois datées par les méthodes de dendrochronologie. Les concentrations en carbone 14 ayant changé au cours des millénaires, cette courbe d'étalonnage permet de repérer la période de mort des tissus ligneux. Il faut tout de même signaler que certaines périodes sont peu propices à la datation au carbone 14. En effet, au cours des millénaires la teneur en carbone 14 n'a pas évolué de façon homogène, certaines périodes, souvent associée à des péjorations climatiques, ont subit des changements assez rapide des concentrations en carbone 14. De ce fait, il est difficile de proposer une seule date, la marge d'erreur associée est ainsi plus importante (jusqu'à 200 à 300 ans). On parle alors de « plateaux » dans les courbes de calibration ; c'est notamment le cas pour l'Age du Fer ou encore pour les Temps Modernes, période pour laquelle il est difficile de différencier une charbonnière de la fin du XVIIe, du XVIIIe ou encore du XIXe siècle d'une carbonisation réalisée pendant la seconde guerre mondiale.

Malgré ces difficultés, la méthode de datation par carbone 14 reste aujourd'hui la méthode la plus employée, la plus fiable pour apporter une dimension temporelle à l'étude des forêts charbonnées. Il faut cependant être vigilant lors des interprétations pour être le plus précis possible dans les restitutions des évolutions des paysages au cours des siècles.

3. Mieux interpréter les résultats de l'analyse anthracologique des plateformes de charbonnage : la nécessité de l'expérimentation

Les plateformes de charbonnage offrent donc de nombreuses possibilités pour étudier de façon précise l'évolution des faciès forestiers. Si l'approche spatiale permettant la cartographie des anciens espaces forestiers a peu évolué depuis sa première application, en revanche, l'approche archéobotanique a beaucoup progressé. Depuis maintenant 30 ans, les méthodes de l'anthracologie ont beaucoup changé, affinant les protocoles de prélèvements, les procédés de tamisage, mettant au point des indices pour évaluer la représentativité des spectres, étudiant les processus de fragmentation ou encore travaillant sur l'état des bois avant carbonisation (Chabal 1992, 1997 ; Loreau, 1994 ; Théry-Parisot, 2001 ; Henry, 2011). Pour développer ces approches de nombreuses expérimentations ont été réalisées mais force est de constater que la majorité a été réalisée sur des foyers ouverts, comme les foyers domestiques où l'apport en oxygène est important et la combustion souvent complète ; cela est très éloigné des contextes de charbonnage où la carbonisation se déroule en milieu réducteur.

Les expérimentations réalisées sur des contextes de charbonnage avaient pour but de connaître le fonctionnement de la carbonisation en meule, d'observer la gestuelle des charbonniers et peu se sont attachées à étudier la représentativité des spectres anthracologiques. La carbonisation en meule, est un processus bien particulier, conduisant à des déformations des charbons de bois bien différentes de celles observées sur les charbons de bois issus de foyers domestiques ; c'est le cas des processus de vitrification encore mal connus (Bonhôte, 1998 ; Davasse, 2000 ; Vaschalde, 2011 ; Oillic, 2011).

Dès le début des recherches conduites sur l'activité de charbonnage, de nombreuses questions propres au contexte de charbonnage ont émergé ; pourtant pour répondre à ces questions, on ne connaît qu'une dizaine d'expérimentations et seulement trois avaient pour objectifs de tester la représentativité des spectres anthracologiques (Fabre, 1996 ; Ludemann, 2006, 2008).

3.1. Quelques expérimentations pour tester la représentativité des spectres anthracologiques en contexte de charbonnage

Depuis 1992, deux équipes de recherches se sont attachées à étudier l'information acquise à l'issue de l'analyse anthracologique des restes charbonneux retrouvés sur les plateformes de charbonnage (Fabre, 1996 ; Ludemann, 2006, 2008). Pour cela lors des expérimentations les auteurs ont cherché à connaître le plus précisément les types d'essences mises dans les meules.

3.1.1. Comparer les spectres anthracologiques à un relevé de végétation

La première expérimentation de charbonnage où les bois mis dans la meule sont à peu près connus a été réalisée par L. Fabre à Montpellier (Fabre, 1992 ; Battesti, 1992 ; Fabre, 1996). L'expérimentation, menée sur une ancienne plateforme de charbonnage, a fait l'objet d'un relevé de végétation pour connaître la composition des bois mis dans la meule. Pour cela, un inventaire de l'ensemble des bois a été réalisé autour de la plateforme couvrant ainsi l'aire d'approvisionnement en bois définit par les charbonniers. Pour que la comparaison soit possible avec les résultats de l'analyse anthracologique, un simple inventaire du nombre d'arbres par essence n'aurait pas été suffisant, une approche quantitative était nécessaire. C'est pourquoi les auteurs se sont attachés, par différentes mesures, à estimer le volume de bois exploitable par arbre puis par essence, ainsi que le nombre potentiel de bûches de 90 cm. C'est donc une image de la végétation qu'ils souhaitent comparer avec les analyses anthracologiques et non pas l'image du tas de bois employé par les charbonniers.

Les prélèvements ont été réalisés une fois que l'essentiel des charbons a été ramassé par les charbonniers, en procédant par unité de fouille de un mètre carré. L'échantillonnage a été réalisé depuis le centre de la plateforme jusqu'à la périphérie ce qui a permis d'identifier une certaine spatialisation des essences. En effet, à l'issue de l'analyse anthracologique, les résultats sont similaires à la végétation coupée par les charbonniers. En revanche, les proportions des essences diffèrent légèrement entre le centre et la périphérie de la meule. Les essences présentant des plus petits diamètres sont principalement retrouvées en périphérie de la plateforme alors que les bois aux plus gros diamètres semblent être au centre, à proximité de la cheminée. Les différences ne sont pas flagrantes, mais témoignent

néanmoins d'une certaine organisation des bois lors de la construction de la charbonnière, en conservant les plus petits bois pour couvrir la meule et combler les interstices évitant à la terre couvrant la meule de s'infiltrer.

A partir de cette étude, et en croisant différentes approches statistiques (descriptive, Analyse en Composante Principale, test du chi^2…) les auteurs ont pu définir quel était l'emplacement le plus représentatif de la végétation charbonnée. Nous l'avons précédemment évoqué, la zone située à mi-distance entre le cœur et la périphérie de la meule apporte les résultats anthracologiques les plus satisfaisants, les charbons du centre et de la périphérie de la meule sont mélangés à cet emplacement.

Dans cette étude, les résultats anthracologiques sont comparés à une image de la végétation sur pied. Il s'agit d'une approche particulièrement intéressante, mais il est probable que lors de la coupe des bois, les charbonniers n'emploient pas toutes les essences, ils en privilégient une plutôt qu'une autre. Une estimation précise des bois mis dans les meules, en mesurant chaque bûche par exemple, aurait permis de définir si les processus de carbonisation en meule sont à l'origine de déformations des charbons de bois : vitrification, fragmentation différentielle selon les essences, influence de la gestuelle des charbonniers sur les résidus charbonneux…

3.1.2. Comparer les spectres anthracologiques aux bois mis dans les meules

Les travaux de Ludemann prolongent cette approche expérimentale. Deux expérimentations de charbonnières en meule ont été réalisées en Forêt Noire. La première est moins approfondie que la seconde, puisque l'auteur ne maîtrise pas parfaitement la composition en essences des bois mis dans la meule. Une simple estimation des proportions d'essences ainsi que des diamètres moyens a été réalisée à partir d'un échantillonnage des bois mis dans la meule. De plus, cette expérimentation était principalement centrée sur l'estimation du diamètre des bois charbonnés, permettant ainsi d'asseoir une nouvelle méthodologie. La part donnée à la représentativité des spectres est très faible dans cet article (Ludemann, 2006).

A l'issue de cette expérimentation, l'auteur a conduit une nouvelle expérimentation en maitrisant cette fois-ci parfaitement le volume de chaque essence mis dans la charbonnière.

Pour cela tous les bois utilisés ont été mesurés, permettant ainsi de connaître le diamètre moyen et le volume de chaque essence employée. Les 2000 charbons identifiés apportent des résultats tout à fait satisfaisants, seul les bois employés pour la construction de la meule (soubassement de la meule) présentent des écarts entre les proportions connues avant la carbonisation et ceux obtenus à l'issue de l'analyse anthracologiques (Ludemann, 2006).

Ces trois charbonnières expérimentales permettent d'apporter de nombreux éléments de réponse quant à l'intérêt d'étudier ces vestiges du point de vue botanique. Cependant, cela reste un corpus expérimental relativement faible. De plus, les essences employées sont très différentes de celles rencontrées dans le Massif central. C'est pourquoi dans le cadre de cette étude nous avons réalisé trois charbonnières expérimentales composées de châtaignier, de chêne, de charme et de hêtre.

3.2. Une nouvelle expérimentation pour tester le comportement d'essences typiques du Massif central

Dans le cadre du Programme Collectif de Recherche « géohistoire et géoarchéologie des territoires forestiers limousins » (dir. Allée), trois charbonnières expérimentales ont été réalisées en septembre 2008. Avec R. Rouaud et P. Allée, nous tenions à mieux comprendre le fonctionnement de la carbonisation en meule et la gestuelle des charbonniers pour mieux interpréter les résultats des analyses anthracologiques (figure 40). Cette expérimentation, réalisée dans l'enceinte des Tuileries de Pouligny (Creuse), avec l'aide des « Charbouniers de Quincy » (association du Cher), a permis de tester la représentativité des spectres anthracologiques et d'évaluer la capacité des outils mis en place pour restituer le diamètre de bois charbonnés. L'analyse des charbons de bois permet-elle de retrouver l'image des bois employés pour construire les meules ?

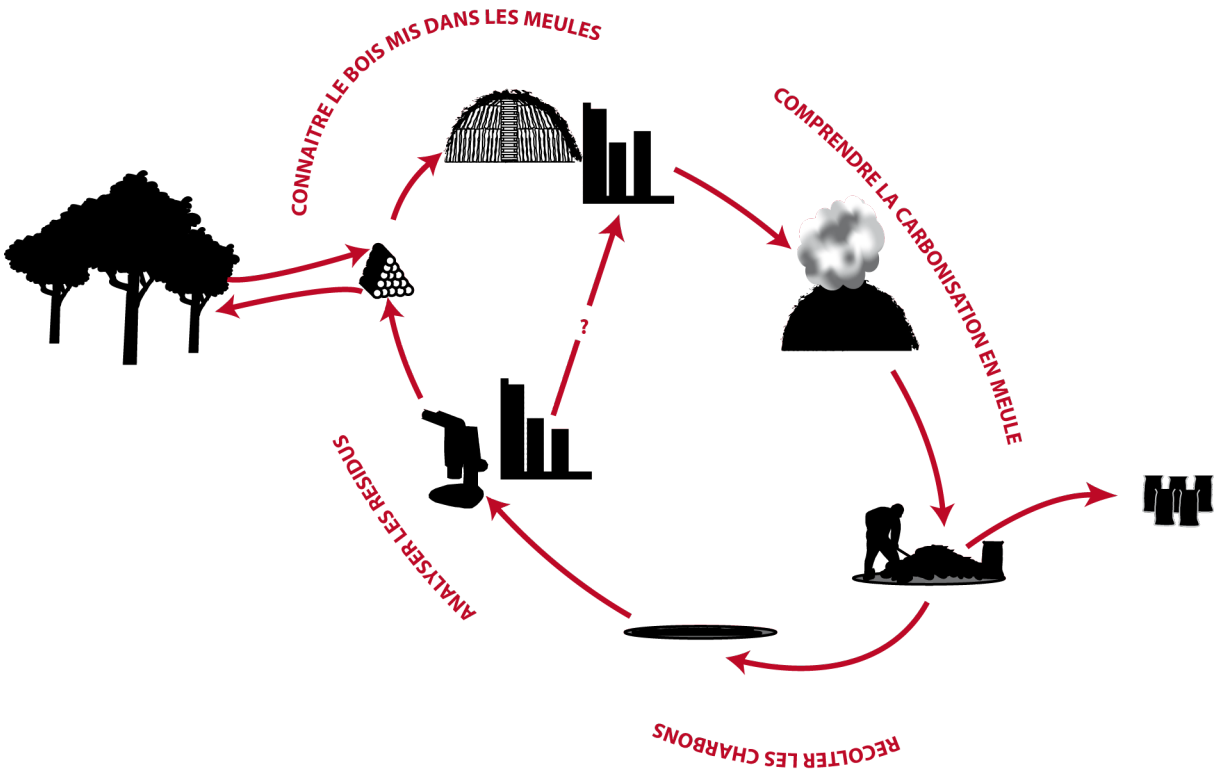


Figure 40 : Schéma de synthèse expliquant les objectifs de l'expérimentation (extrait de Paradis-Grenouillet et Rouaud, 2009)

Dans le cadre de ce chapitre seul la représentativité des spectres anthracologiques sera présentée car la démarche conduite sur les diamètres de bois nécessite la vérification des méthodes de mesure du rayon de courbure et des modèles de restitution des diamètres ; cela fera l'objet d'une étude plus détaillée dans les chapitre 4 et 5

3.2.1. Protocole expérimental

a) Préparation des bois et aménagement des plateformes

Pour comparer les spectres anthracologiques au bois mis dans les meules, il était nécessaire de maîtriser parfaitement les bois initialement mis dans chaque charbonnière. Aussi, quelques mois auparavant nous avons coupé le bois sur pied et débité en bûches de 50 cm. Le chêne, le hêtre et le charme ont été coupés sur le site, mais le châtaignier peu présent autour du site de charbonnage a été coupé en Haute Vienne. Afin de bien maîtriser les proportions de bois pour chaque essence sans gêner le travail des charbonniers, chaque bûche a été mesurée en amont puis identifiée par un code inscrit au feutre. Le code se

compose de deux lettres et de trois chiffres. Les deux lettres indiquent l'espèce : CE pour chêne, H pour hêtre, CG pour châtaignier et CA pour charme ; les trois chiffres donnent le numéro de la bûche. Les mesures réalisées ont été ensuite saisies dans un tableur Excel, ce qui nous permet ainsi de connaître le nombre de bûches par essence ainsi que le volume et la surface que cela représente (figure 41).

A

B

Hêtre	Rayon 1	Rayon 2	Hauteur	Volume	Surface
H140	1,11	1,11	38,00	148,10	7,00
H141	1,11	1,27	38,00	170,01	7,50
H465	1,43	1,27	50,00	287,33	8,50
H482	1,43	1,27	44,00	252,85	8,50
H585	1,27	1,43	58,00	333,30	8,50
H788	1,43	1,27	56,00	321,81	8,50
H790	1,43	1,27	60,00	344,79	8,50
H837	1,43	1,27	44,00	252,85	8,50
H914	1,43	1,27	59,00	339,05	8,50
H487	1,43	1,43	38,00	244,82	9,00
H579	1,43	1,43	49,00	315,68	9,00
H702	1,43	1,43	56,00	360,78	9,00
H910	1,43	1,43	50,00	322,13	9,00
H055	1,43	1,59	46,00	330,20	9,50
H103	1,59	1,43	52,00	373,27	9,50
H123	1,43	1,59	66,00	473,76	9,50
H403	1,27	1,75	65,00	466,58	9,50
H443	1,59	1,43	47,00	337,38	9,50

Figure 41 : (A) Photographies de la préparation des bois (Cliché S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud). (B) Extrait d'un tableur d'enregistrement de l'ensemble des bois

Cette expérimentation avait également pour objectif de tester la représentativité des spectres dendrométriques. Nous avons donc coupé des bois présentant une large gamme de diamètres, allant globalement de 2 à 40 cm de diamètre. Or les charbonniers nous accompagnant pour la construction des meules, n'emploient jamais de bois ayant des diamètres supérieur à 10 cm. Nous avons donc refendu l'ensemble des bûches considérées trop grosses par les charbonniers. Sur chaque fragment le code de la bûche a également été inscrit pour permettre son identification lors de la construction des meules et le nombre de fragments a été enregistré dans le tableur Excel.

Pour procéder à cette expérimentation, nous avons choisi d'utiliser un emplacement stérile de toute activité de charbonnage afin de s'assurer que les charbons prélevés proviennent bien des meules que l'on a carbonisées et non pas d'une activité antérieure. Pour cela le sol a été aplani, légèrement creusé, et une réserve de terre a été constituée aux abords des plateformes pour couvrir les meules.

b) Construction de trois meules différentes

Lors de la construction des meules, sur chaque plateforme nous avons préparé les tas de bois en enregistrant l'ensemble des codes des bûches. Les charbonniers ont alors réalisé leur travail, en choisissant librement les bûches qu'ils souhaitaient employer. Les bûches trop grosses, trop longues ou trop courtes ou encore trop déformées ont ainsi été écartées. Une fois les meules construites, il a fallu simplement retirer les codes des bûches non employées dans le décompte des bois mis dans les meules.

Pour tester la représentativité des spectres dendrométriques, trois meules aux diamètres différents ont été construites : une constituée uniquement des bûches aux diamètres inférieurs à 10 cm, une autre uniquement des bûches supérieures à 10 cm de diamètre (uniquement des bûches refendues) et une troisième présente un mélange de l'ensemble des diamètres.

Au sein de chaque charbonnière les proportions des quatre essences choisies varient également, les trois meules ont la physionomie suivante (figure 42) :

- la charbonnière aux petits diamètres (bûches rondes aux diamètres inférieurs à 10 cm) est composée de 38 % de châtaignier, 33 % de hêtre, 21 % de chêne, et de 8 % de charme.
- la charbonnière aux gros diamètres (bûches refendues aux diamètres supérieurs à 10 cm) présente 47 % de chêne, 27 % de châtaignier, 16 % de charme et 10 % de hêtre.
- la charbonnière constituée d'un mélange de tous les diamètres présente 48 % de chêne, 27 % de châtaignier, 17 % de hêtre et 8 % de charme.

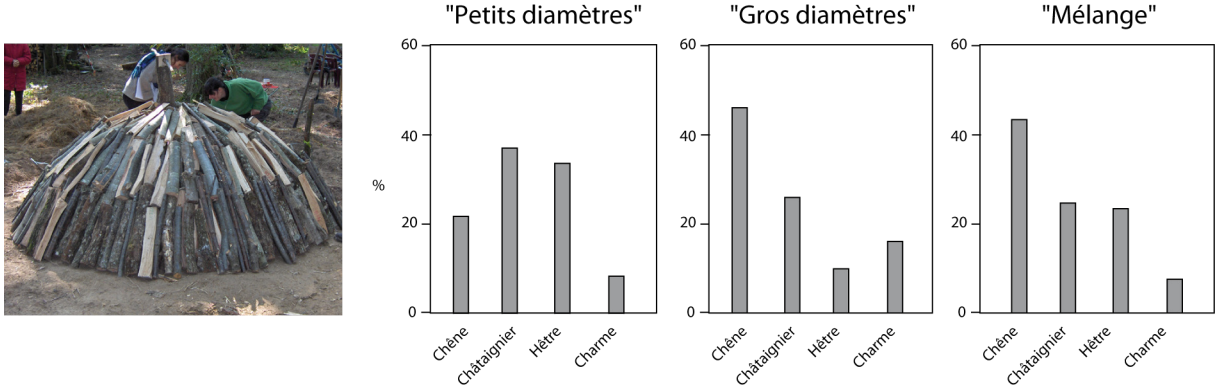


Figure 42 : (A) Photographie de la charbonnière aux gros diamètres en construction. (B) Proportions de volume des différentes essences mises dans chacune des meules

c) Protocole de prélèvement et analyse au laboratoire

Afin de tester la représentativité des spectres anthracologique, nous avons cherché à obtenir le prélèvement le plus proche des résidus que l'on retrouve sur les plateformes de charbonnage archéologiques. Pour cela, les prélèvements ont été effectués une fois le ramassage des charbons commercialisables terminé.
Pour chaque charbonnière, quatre prélèvements ont été réalisés, la plateforme ayant été divisée en quatre. Sur chaque secteur une fenêtre d'environ 30 cm de côté a été échantillonnée systématiquement à mi-chemin entre le centre et la périphérie de la plateforme.

De retour au laboratoire les échantillons ont été tamisés à sec à 4 et 2 mm pour retirer la fraction trop fine composée principalement de cendre et de terre. En raison des quantités importantes de charbon de bois, et pour rester le plus objectif possible, un sous échantillonnage a été réalisé pour procéder à l'analyse anthracologique. Ceci permettant la détermination de l'ensemble des fractions représentées et donc de ne pas privilégier les plus gros charbons. Les analyses ont été réalisées sur l'ensemble des prélèvements, principalement sur la fraction supérieure à 4 mm.

La comparaison des spectres anthracologiques aux proportions de bois initialement mis dans les meules s'effectue généralement en comparant le nombre de charbons retrouvés par essence à des proportions de volume de bois (Fabre, 1996 ; Ludemann, 2006, 2008). Il est généralement acquis que le nombre de charbons est adapté pour construire les spectres anthracologiques (Chabal, 1992, 1997). Dans le cadre de cette étude nous avons cherché à tester si les spectres établis en fonction du volume ou encore de la surface des charbons étudiés étaient plus représentatifs des données connues avant la carbonisation. Pour cela, chaque charbon a fait l'objet de trois mesures au pied à coulisse selon les sections transversales, radiales et longitudinales.

Pour chaque secteur étudié, 150 à 300 charbons ont systématiquement été déterminés. L'étude détaillée de chaque secteur permet ainsi d'évaluer dans un premier temps si les spectres anthracologiques sont représentatifs des échantillons prélevés tout en comparant l'information apportée par les trois unités de mesure que sont le nombre, le volume et la surface des charbons. De plus cette approche sectorisée permet également de mettre en

évidence la présence d'une spatialisation des essences au sein des plateformes.
Enfin il convient d'associer l'ensemble des charbons étudiés pour vérifier si l'analyse anthracologique conduite sur chaque charbonnière permet de restituer les proportions des quatre essences placées dans les meules, et d'évaluer si une unité de mesure doit être privilégiée pour présenter les résultats anthracologiques.

3.2.2. Des spectres anthracologiques représentatifs des prélèvements

Avant d'évaluer si les spectres anthracologiques permettent de restituer les proportions des quatre essences il convient d'abord d'étudier dans le détail les résultats obtenus pour chaque secteur et vérifier si les analyses sont bien représentatives du lot de charbons prélevés. Pour cela des graphiques représentant l'évolution des fréquences tous les dix charbons ont été construits, la stabilisation des courbes permettant d'identifier l'effectif optimal de charbon à étudier (annexes 1, 2, 3). A l'issue de cette analyse on constate que, quelle que soit la charbonnière et le secteur, la stabilisation s'effectue relativement rapidement. Le plus souvent avec moins de 100 charbons les proportions sont stabilisées. La stabilisation la plus rapide a été observée sur le secteur 4 de la charbonnière au mélange de diamètres alors que la stabilisation la plus longue a été constatée sur le secteur 4 de la charbonnière aux petits diamètres (figure 43 A et B).

Lors de cette analyse, les graphiques d'évolution de fréquence ont été réalisés en fonction du nombre, de la surface et du volume des charbons analysés. Ces trois unités de mesures présentent des comportements différents sur les graphiques d'évolution de fréquence. En effet, l'information apportée par un petit ou un gros charbon ne sera pas la même lors de calcul de fréquence ; en fonction du nombre de charbons l'information sera le même, alors qu'en fonction de la surface et du volume les gros charbons feront varier de façon plus importantes les proportions des quatre essences qu'un petit charbon. Cela est particulièrement visible sur le secteur 4 de la charbonnière aux petits diamètres (figure 43 B). Ces fluctuations observées pour les proportions de volume et de surface se situent généralement entre 75 et 150 charbons ; cela s'explique par un ajout en cours d'analyse de quelques gros charbons. En effet, lors de l'analyse, pour étudier l'ensemble de la fraction supérieure à 4 mm sans sélectionner uniquement les plus gros fragments, nous avons procédé à des sous échantillonnages correspondant à environ une centaine de charbons.

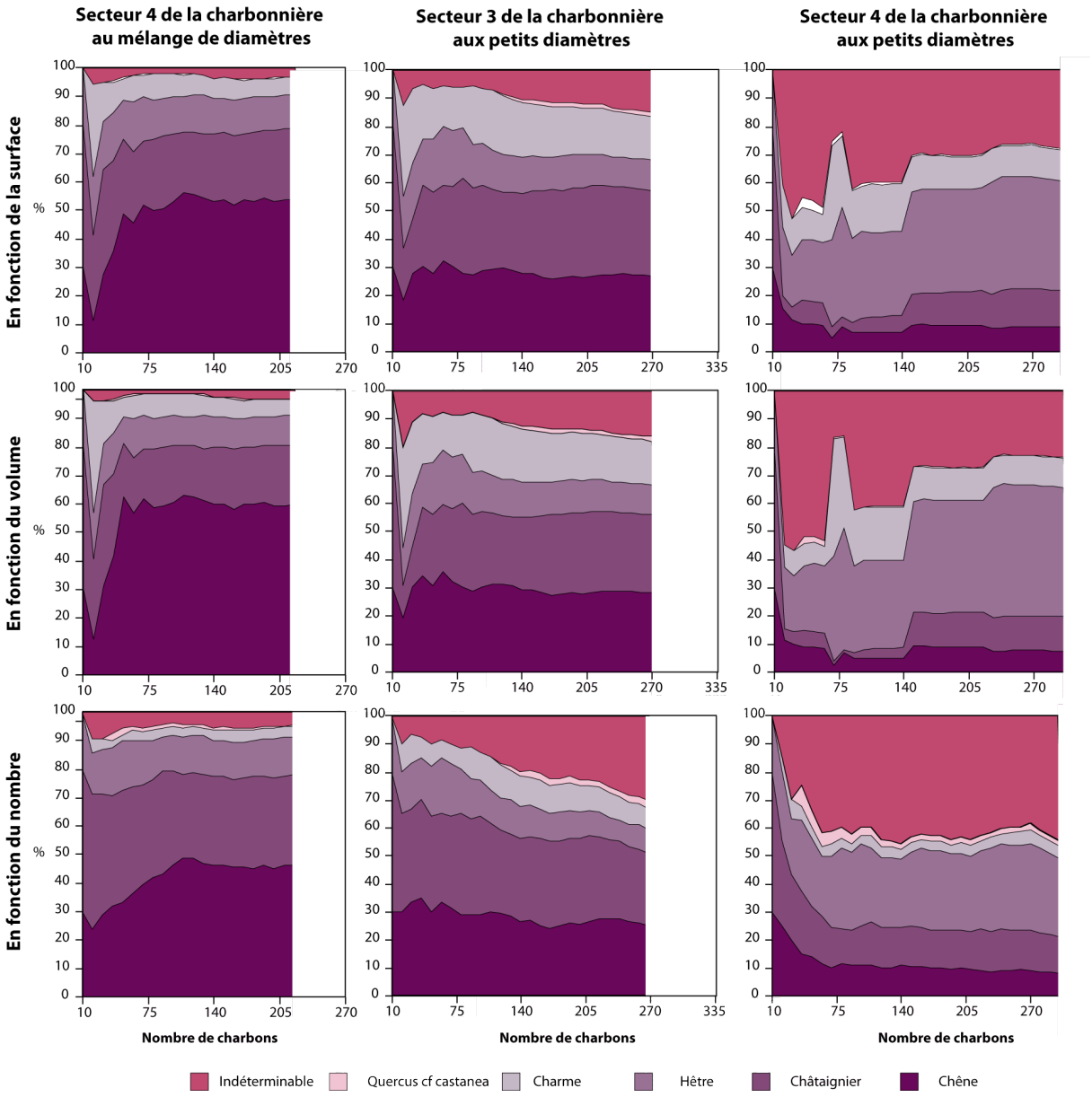


Figure 43 : Exemple de graphiques d'évolution de fréquence. (A) Secteur 4 de la charbonnière au mélange de diamètres. (B) Secteur 4 de la charbonnière aux petits diamètres. (C) Secteur 3 de la charbonnière aux petits diamètres

Pour chaque sous-échantillon, l'analyse a toujours été réalisée en commençant par les plus gros charbons pour finir par les plus petits. Les charbons indéterminables, parmi lesquels on retrouve majoritairement des écorces, sont souvent de petites tailles ; de ce fait ils sont analysés à la fin du sous-échantillonnage. Pour obtenir un nombre de charbon déterminé plus important, un nouveau sous-échantillonnage a alors été réalisé introduisant dans l'analyse à nouveau de gros fragments de charbon. C'est ce nouveau sous-échantillonnage qui est à l'origine de ces variations importantes dans les proportions.

A l'issue de cette analyse on constate également un facteur important de déformation des spectres anthracologiques. La prise en compte des charbons indéterminables dans la construction des courbes de fréquence empêche la stabilisation des proportions sur certains secteurs ; cela est notamment visible sur les graphiques construits en fonction du nombre. En effet, plus le nombre de charbons est important plus on voit augmenter les proportions d'indéterminables sur les graphiques établis à partir du nombre de fragments, alors que sur ceux construits sur le volume et la surface on ne constate aucune évolution. En effet, en prenant en considération le nombre de charbons, l'ensemble des petits fragments d'écorce a autant de poids dans l'analyse qu'un seul gros charbon de hêtre par exemple. L'augmentation du nombre de charbons indéterminables conduit à changer les proportions des quatre essences, empêchant ainsi la stabilisation des spectres établis en fonction du nombre de charbons. Cela est particulièrement visible sur le secteur 3 où, à 250 charbons, la proportion d'indéterminables continue d'augmenter au détriment des autres essences (figure 43 C). Nous y reviendrons plus loin mais, dès lors, nous pouvons constater que l'utilisation des charbons indéterminables peut être problématique pour la construction des spectres anthracologiques.

3.2.3. Une spatialisation des essences au sein des plateformes

Les prélèvements sur quatre secteurs pour chacune des meules permettent d'identifier des différences de répartition des essences et cela sur les trois plateformes. Il convient de présenter dans le détail les résultats obtenus sur les trois meules pour expliquer ce phénomène de spatialisation.

A l'issue de l'analyse anthracologique, les résultats obtenus sur la charbonnière aux petits diamètres mettent en évidence des écarts importants entre les proportions de chêne et de hêtre sur les différents secteurs. En effet, on retrouve sur une moitié de la plateforme des proportions plus importantes de hêtre alors que sur l'autre ce sont les proportions de chêne qui dominent. Les secteurs 2 et 3 présentent de faibles proportions de hêtre (10 à 15 % selon les unités de mesure), alors qu'il est majoritaire dans les secteurs 1 et 4 avec des valeurs proches de 50 %. Sur les secteurs pauvres en hêtre, c'est le chêne qui domine. Les deux autres essences présentent des différences moins marquées. Le châtaignier présente également quelques différences entre les secteurs. En effet, il est presque majoritaire dans

le secteur 3 avec près de 32 % alors qu'il est presque minoritaire dans le secteur 4 avec moins de 12 % et le charme présent en plus faibles proportions est représenté dans les secteurs 1 et 4 par moins de 5 %, alors qu'on en retrouve 10 à 16 % dans les deux autres secteurs (figure 44).

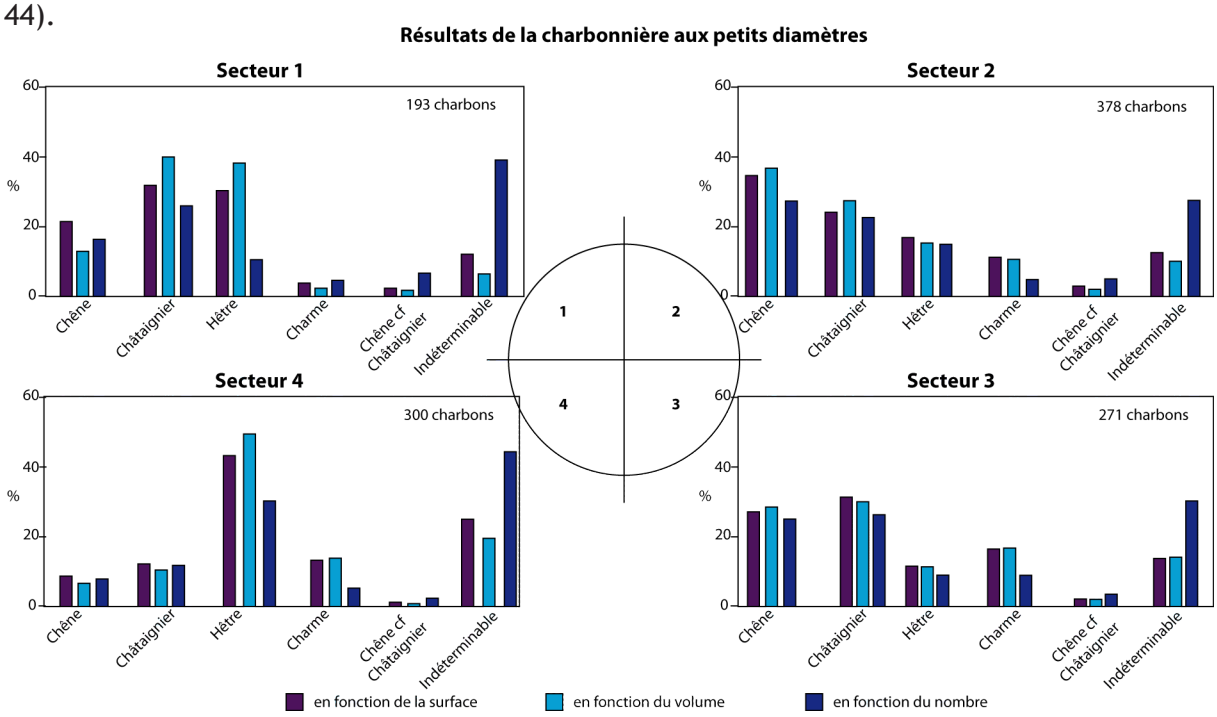


Figure 44 : Résultats de l'analyse anthracologique conduite sur les quatre secteurs prélevés sur la charbonnière aux petits diamètres

Les résultats obtenus sur la charbonnière aux gros diamètres mettent également en évidence une inégale répartition des essences, mais cette fois ci c'est le chêne et le charme qui semble s'opposer. Les résultats obtenus pour le chêne à partir des proportions de surface sont de 39 et 33 % pour les secteurs 1 et 4 et seulement de 21 % pour les secteurs 2 et 3. Au contraire, le charme présente des proportions plus fortes dans les secteurs 2 et 3 (31% et 19%), alors que les secteurs 1 et 4 n'en présentent que 9 % (figure 45). Pour cette charbonnière on note également une inégale répartition des proportions de hêtre, mais cela est moins évident à distinguer car le découpage semble se faire selon la diagonale de la meule. Les secteurs 2 et 4 en présentent 26 et 32 % pour les proportions de surface, alors que les deux autres secteurs n'en présentent que 17 %.

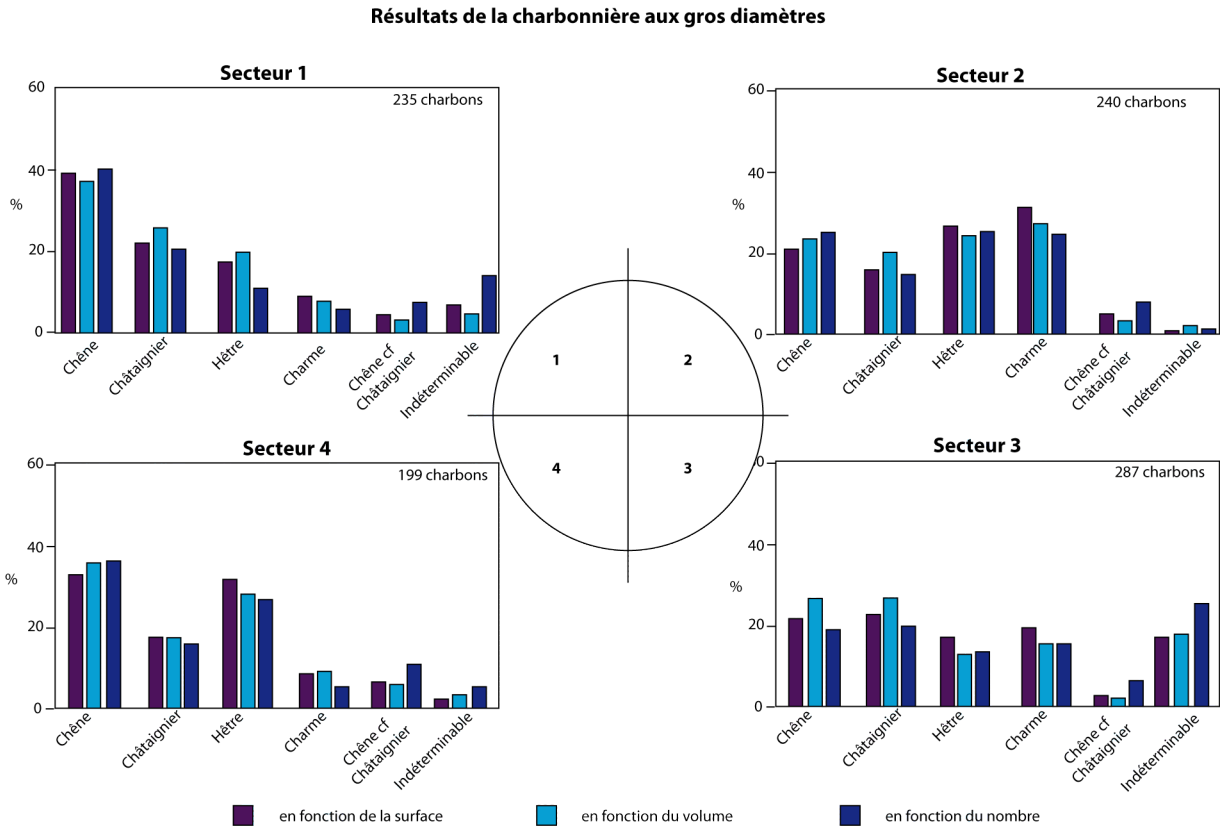


Figure 45 : Résultats de l'analyse anthracologique conduite sur les quatre secteurs prélevés sur la charbonnière aux gros diamètres

Enfin en ce qui concerne la charbonnière au mélange de diamètres, on retrouve seulement de plus fortes concentrations de chêne sur une moitié de la meule (secteur 1 et 4) avec près de 60 % des proportions de volume dans le secteur 1, mais on ne retrouve pas d'essence fonctionnant en opposition. En effet, la deuxième moitié étant composée de toutes les essences dans des proportions très similaires (figure 46). Sur cette plateforme, comme pour la charbonnière aux gros diamètres, on observe une répartition également suivant une diagonale. Par exemple, les plus fortes valeurs de châtaignier se trouvent sur les secteurs 2 et 4 avec 34 % et 25 % sur les proportions de surface, alors que les secteurs 1 et 3 n'en contiennent que 12 % et 13 %.

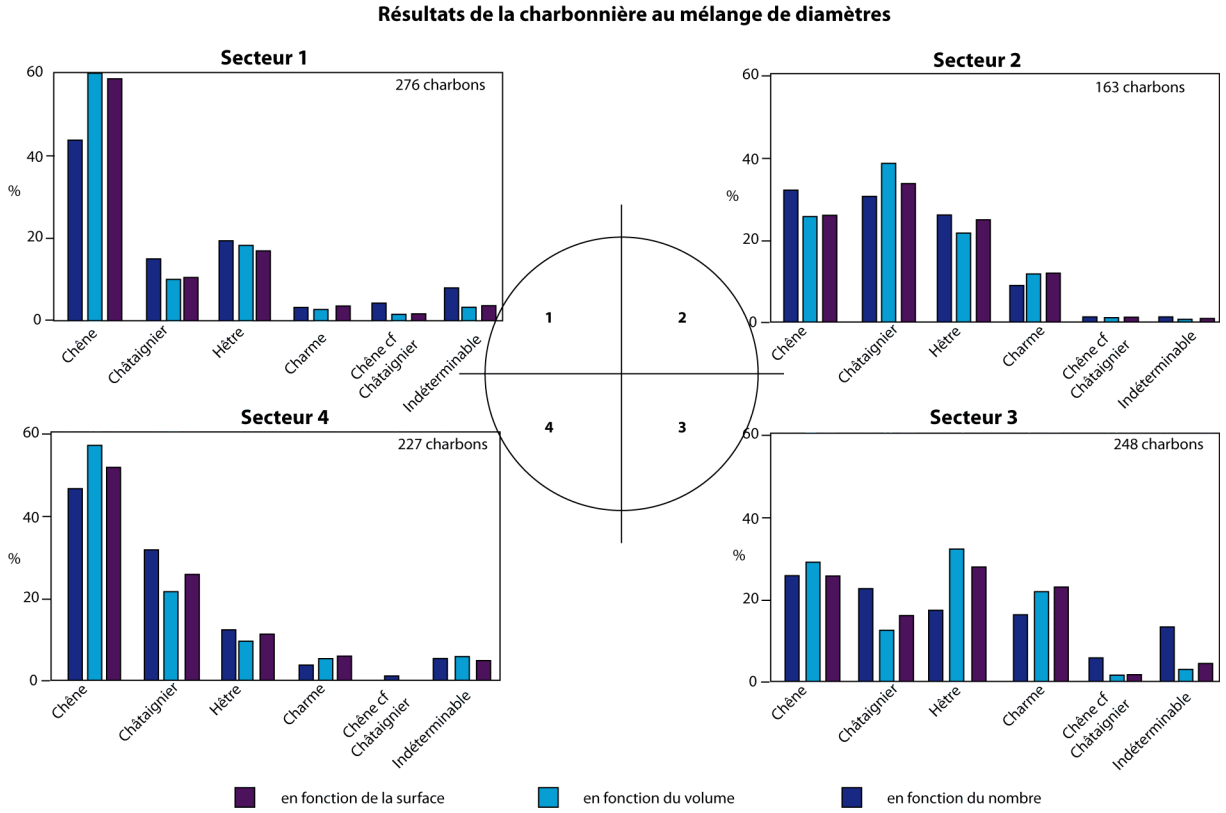


Figure 46 : Résultats de l'analyse anthracologique conduite sur les quatre secteurs prélevés sur la charbonnière présentant un mélange de diamètres

L'ensemble de ces résultats met en avant une sorte de spatialisation des espèces de bois à l'échelle de la plateforme ; la répartition par moitié d'essences qui s'opposent est relativement facile à expliquer par les arrivages de bois sur les meules. En effet, pour contrôler parfaitement les bois qui étaient mis dans les meules, les bûches arrivaient sur la plateforme par brouettes triées par essences. Lors du montage des meules, même si à aucun moment nous n'avons évoqué avec les charbonniers une volonté de trier les essences, et même si cela n'est pas dans leur mode de fonctionnement habituel, il semble que les charbonniers aient placé, sans s'en rendre compte, d'un côté des meules une brouette d'une essence et de l'autre une brouette d'une autre essence. Cela peut donc expliquer cette spatialisation des essences.

Mais à l'issue de ces observations on peut se demander si cette spatialisation est uniquement liée au protocole analytique de cette expérimentation ou bien si cela se retrouve sur l'ensemble des plateformes de charbonnage. Nous l'avons précédemment évoqué, à ce jour, rares sont les études mettant en évidence une telle variabilité spatiale (Fabre, 1996 ;

Marque, 2007). De plus généralement les différences de proportions entre les secteurs sont de plus faibles amplitudes, ce qui ne semble pas modifier radicalement la restitution des sylvofaciès des forêts charbonnées.

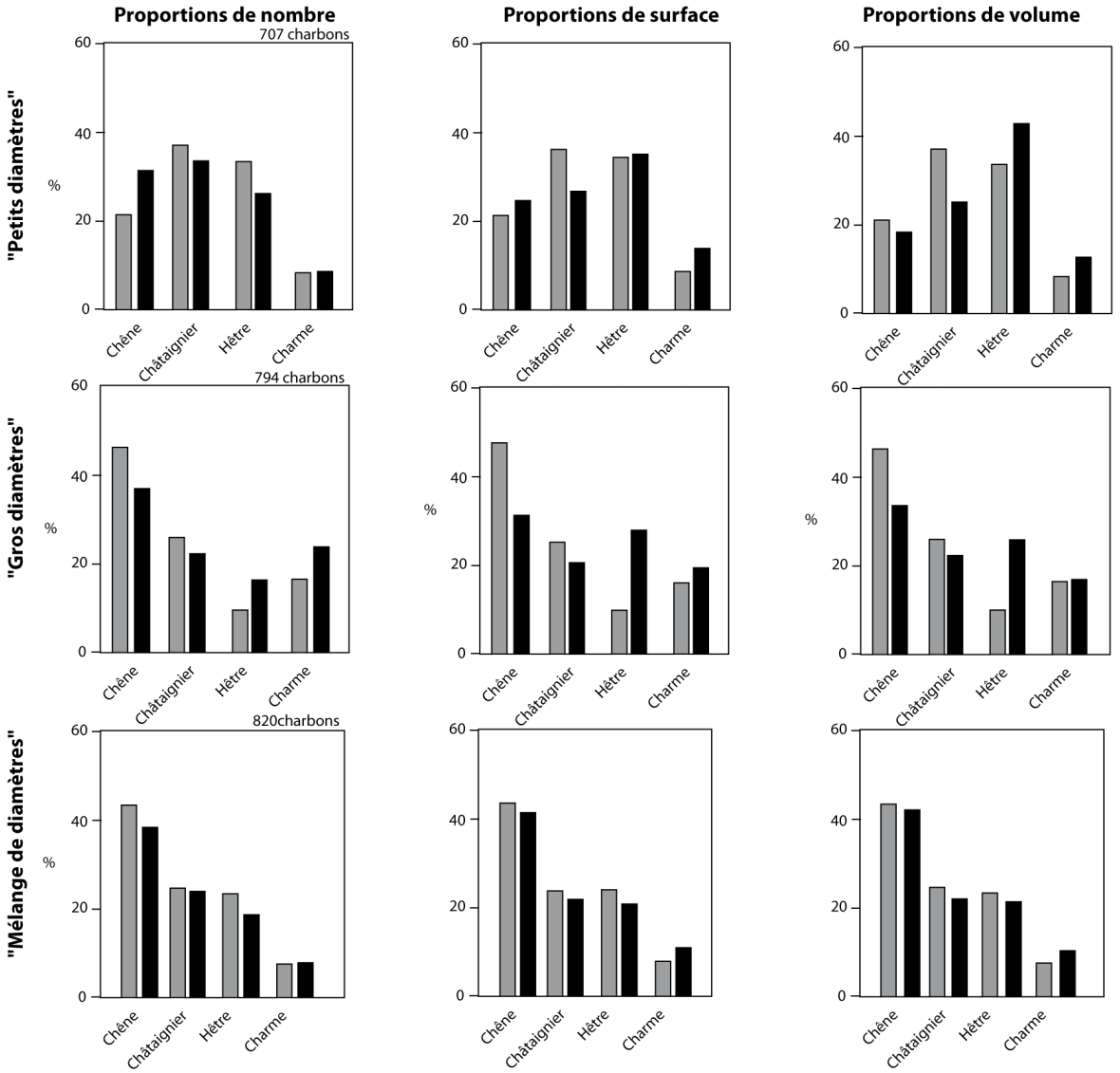
3.2.4. L'analyse anthracologique, bien représentative des bois mis dans la meule

Pour tester la représentativité des spectres anthracologiques, nous avons pris en compte l'ensemble des charbons étudiés pour chaque charbonnière. Les proportions ont été établies en fonction du nombre, du volume et de la surface, ce qui permet ainsi de comparer les trois unités de mesure entre elles mais également d'observer qu'elle est la meilleure pour s'approcher des proportions connues avant la carbonisation.

a) Etudier les écarts entre les proportions connues avant la carbonisation et les résultats de l'analyse anthracologique

On retrouve pour les trois charbonnières des résultats assez satisfaisants, l'ordre des proportions est relativement bien retrouvé (figure 47). En effet, l'essence majoritaire dans les proportions connues avant la carbonisation est retrouvée systématiquement à l'issue de l'analyse anthracologique, seules les essences en faibles proportions présentent dans certains cas des écarts un peu plus importants. Il est donc pertinent d'étudier en détail les résultats obtenus pour chaque essence et pour chaque charbonnière, mais pour cela il est intéressant de travailler sur des écarts relatifs et non pas sur les écarts absolus.

Prenons l'exemple du châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres (figure 47), la proportion connue avant la carbonisation est de 38 %, à l'issue de l'analyse anthracologique on retrouve 25 % de cette essence en fonction du volume des charbons, 27 % en fonction de la surface et 34 % en fonction du nombre. Cela correspond donc à des écarts respectifs de 12, 7 et 3 % en valeur absolue. Si l'on rapporte ces écarts à la valeur théorique, c'est à dire à la valeur connue avant la carbonisation, ce qui revient à calculer un pourcentage d'erreur, on obtient près de 10 % d'erreur en fonction du nombre, près de 27 % en fonction de la surface et 32 % en fonction du volume. Ce calcul des pourcentages d'erreur est primordial pour comparer les écarts entre les proportions connues et les proportions obtenues par l'analyse anthracologique notamment pour comparer les écarts pour les essences majoritaires avec les écarts obtenus sur les essences minoritaires.



Pourcentage d'erreur entre les proportions connues avant la carbonisation et celles obtenues à l'issue de la carbonisation :

entre 0 et 15 % l'erreur est considérée comme faible
entre 15 et 30 % comme moyenne
et supérieur à 30 % comme trop importante

	nombre	surface	volume
Chêne	-47,7	-16,6	13,3
Châtaignier	9,8	26,7	31,7
Hêtre	20,8	-2,6	-30,0
Charme	-4,9	-61,5	-57,1

	nombre	surface	volume
Chêne	20,9	34,9	27,6
Châtaignier	15,5	18,7	14,2
Hêtre	-65,9	-186,1	-161,5
Charme	-44,8	-20,8	-4,1

	nombre	surface	volume
Chêne	2,5	0,7	0,0
Châtaignier	-10,0	2,0	8,2
Hêtre	11,5	10,5	5,0
Charme	-17,4	-40,2	-40,9

Proportions avant carbonisation:
Proportions après carbonisation:

Figure 47 : (A) Comparaison des proportions connues avant la carbonisation avec les proportions obtenues à l'issue de l'analyse anthracologique en fonction du nombre, du volume et de la surface. (B). Tableaux de synthèse des pourcentages d'erreur.

Cette démarche a été appliquée pour l'ensemble des charbonnières. Ainsi les données brutes sont d'abord représentées sous forme d'histogrammes de fréquence auxquels est ajouté un tableau récapitulatif de l'ensemble des pourcentages d'erreur obtenus (figure 47).Pour simplifier la lecture des tableaux de synthèse, nous avons établi trois classes de pourcentages d'erreur entre les données connues avant la carbonisation et celles obtenues à l'issue de l'analyse anthracologique. Entre 0 et 15 % d'erreur la différence est considérée comme faible, entre 15 et 30 % d'erreur, elle est considérée comme moyenne et enfin au delà de 30 % la différence est trop importante.

A l'issue de cette analyse on constate que les résultats obtenus sur la charbonnière au mélange de diamètres sont particulièrement satisfaisants (figure 47), avec pour le chêne, le châtaignier et le hêtre des pourcentages d'erreur inférieurs à 15 % quelle que soit l'unité de mesure choisie. Seul le charme présente des pourcentages d'erreur importants avec plus de 40 % d'erreur en fonction de la surface et du volume. De plus, il est intéressant de constater que les proportions sont systématiquement surévaluées.

Lors de cette analyse on constate des différences très importantes pour la charbonnière aux gros diamètres (figure 47). Il est difficile d'attribuer ces écarts à la carbonisation car, pour cette charbonnière, lors de la construction l'ensemble des bois n'a pas pu être parfaitement contrôlé. Il s'agit de bûches refendues, même si chacun des fragments a été identifié par le même numéro, que le nombre exact de fragments produits était connu, lors de la construction, certaines bûches n'ont pas été mises entièrement. De ce fait il a fallu estimer les proportions de bois mis dans la meule. Nous connaissions le nombre exact de fragments par bûche. En divisant le volume de la bûche par le nombre de fragments, nous avons calculé le volume moyen par fragment. Ainsi puisque le code de chaque fragment de bois a été relevé lors de la construction des meules il a été possible d'évaluer le volume mis dans la meule pour chaque bûche. Si une bûche avait été découpée en 30 fragments et que seulement 15 d'entre eux ont été placés dans la meule, alors le volume de cette bûche comptabilisé dans les proportions de bois mis dans la meule correspond à la moitié du volume de la bûche. Cependant le volume moyen par fragment n'est qu'une approximation. En effet, les bûches ont été fendues à la main, les fragments étant dans la majorité des cas complètement inégaux. Cela peut donc expliquer en partie ces écarts si importants pour le chêne et le hêtre qui présentaient les plus gros diamètres. Ces bûches n'ont pas

été complètement employées dans la même charbonnière. Si les plus gros fragments ont été mis pour le hêtre et au contraire les plus petits pour le chêne, alors ces sur et sous - représentations peuvent être expliquées. Mais il nous est aujourd'hui impossible d'élucider ce problème.
Si le charme et le châtaignier présentent des résultats tout à fait satisfaisants, ils peuvent s'expliquer par une « refente » beaucoup moins importante de ces essences ; les fragments d'une même bûche ont généralement été mis dans la même meule, ce qui ne semble pas avoir été le cas pour le chêne et le hêtre.

Enfin, en ce qui concerne la charbonnière aux petits diamètres, celle-ci présente des résultats plus mitigés. Selon les essences et les unités de mesure les écarts sont très différents, et laissent entrevoir un processus de fragmentation différentielle entre les essences.

b) Mise en évidence d'une fragmentation différentielle entre le chêne et le hêtre

Les résultats obtenus à l'issue de l'analyse anthracologique de la charbonnière aux petits diamètres montrent une nette opposition entre les proportions de nombre et de volume obtenus pour le chêne et le hêtre. En effet, alors que le chêne est surreprésenté avec les proportions de nombre il est au contraire sous-représenté par les proportions établies en fonction du volume (figure 47). On observe le phénomène inverse pour le hêtre, les proportions de volume sont surreprésentées alors que celles établies en fonction du nombre sont sous-évaluées. Cette opposition témoigne d'une taille moyenne de charbon différente entre ces deux essences. Globalement les charbons de chêne sont plus petits que ceux de hêtre, ce qui influence fortement les spectres anthracologiques.

Bien que cette opposition ne soit aujourd'hui observée que sur cette charbonnière, il semble intéressant de continuer à utiliser au moins les proportions de volume et de nombre pour calculer les proportions des essences, ceci permettant d'évaluer si les spectres anthracologiques obtenus ne sont pas influencés par des processus de fragmentation différentielle.

c) La sous - représentation du châtaignier et la surreprésentation du charme dans les assemblages

Sur les trois charbonnières étudiées il a été remarqué une sous - représentation systématique des proportions de châtaignier alors que le charme est au contraire systématiquement surreprésenté (figure 47). Si les écarts entre les données connues avant la carbonisation et ceux obtenus à l'issue de l'analyse anthracologique sont raisonnables en ce qui concerne le châtaignier (majoritairement inférieur à 30 %) en revanche, en ce qui concerne le charme les pourcentages d'erreur sont beaucoup plus élevés, avec 6 valeurs sur douze supérieures à 40 %.
Compte tenu du faible nombre d'observation il est encore délicat de proposer une explication, cela peut provenir d'un comportement spécifique de ces essences. Le châtaignier serait peut être plus affecté par les processus de carbonisation. Cette essence est-elle plus sujette à une réduction en cendres ? Au contraire, le charme retrouvé dans des proportions supérieures à celles initialement mises dans les meules résiste-t-il mieux à la carbonisation ? Il est important de poursuivre ces analyses.

En conclusion de cette analyse, il est rassurant d'observer que dans l'ensemble les proportions des quatre essences sont globalement retrouvées. Il est bien évident que la valeur connue avant la carbonisation est rarement atteinte mais l'on retrouve tout de même l'ordre des proportions, l'essence majoritaire étant toujours dominante à l'issue de l'analyse anthracologique.
Ce travail a également permis de soulever de nombreuses questions concernant la fragmentation différentielle en fonction des essences, la spatialisation des essences au sein d'une plateforme ou encore sur le choix de l'unité de mesure à employer. Ces études doivent être poursuivies et notamment en simplifiant le protocole analytique. En effet, la combinaison d'un mélange d'essences et de différents diamètres complique grandement les interprétations par la suite.

3.2.5. Les charbons indéterminables déforment les spectres mais apportent une potentielle information sur le type de bois employé

A partir de cette analyse nous avons également pu mesurer le rôle fondamental que jouent les charbons indéterminables sur les spectres anthracologiques. Ces charbons sont de petites tailles ; ici, il s'agit dans la majorité des cas de fragments d'écorce. Du fait de leurs tailles ces charbons sont couramment analysés en dernier. Malgré la volonté de réaliser un tirage aléatoire, l'anthracologue, pour son confort de travail, commence généralement par les plus gros charbons et finit par les plus petits, les écorces sont donc identifiées à la fin du sous échantillonnage (Paradis, 2007). De précédentes études ont démontré que pour présenter les données anthracologiques il est préférable d'exclure ces charbons indéterminables de l'analyse (Chabal, 1992, 1997). En effet, pour réaliser des interprétations paléoécologiques ils ne présentent pas d'intérêt et déforment même les proportions des taxons déterminés. En revanche dans le cadre de cette analyse il nous semble pertinent de dénombrer au moins les fragments d'écorce. Lors de cette expérimentation un nombre plus important de fragments d'écorce a été retrouvé lors de l'analyse des restes charbonneux de la charbonnière aux petits diamètres (avec plus de 40 % des proportions établies en fonction du nombre sur certains secteurs) (figure 44), alors qu'on en retrouve très peu sur les deux autres charbonnières. La présence d'un grand nombre d'écorces peut alors être un bon indice pour distinguer l'emploi de bûches entières d'une utilisation de bûches refendues.

L'utilisation de bûches entières produirait-elle plus de fragments d'écorce ? Cette piste doit encore être explorée.

Conclusion

A travers cette analyse on constate combien la plateforme de charbonnage est un objet d'étude particulier et privilégié pour conduire des recherches sur l'histoire des forêts charbonnées et donc des « forêts métallurgiques ». Ces vestiges permettent non seulement une analyse très précise de l'évolution des contours des anciens espaces forestiers, des fluctuations de la limite supérieure de la forêt, mais à travers l'analyse botanique ces structures archéologiques permettent également de restituer une image assez fiable des anciens sylvofaciès.

Bien que de nombreuses questions restent encore en suspens, à la lumière de cette expérimentation les spectres anthracologiques peuvent être directement associés à la composition en essences des meules construites, ce qui permet d'envisager plus sereinement la restitution des essences des forêts charbonnées. Mais la question du choix des bois est bien plus complexe qu'un simple choix de l'essence ; on sait par ailleurs que le diamètre des bois prenait une place importante dans la construction des meules. Duhamel du Monceau rapporte une utilisation de bois de petits diamètres pour la construction de meule du XVIIIe siècle (Duhamel du Monceau, 1774). Mais à travers d'autres recherches certains auteurs évoquent l'utilisation des restes d'exploitation de futaie, d'autres de grosses branches etc. Il est donc particulièrement important d'approfondir la recherche pour étudier de près la fiabilité des analyses dendro - anthracologiques des résidus charbonneux retrouvés sur les plateformes de charbonnage. Les deux chapitres suivants seront consacrés à cette démarche, en commençant par étudier la fiabilité des outils permettant de mesurer le rayon de courbure avant de tester la représentativité des spectres dendrométriques obtenus sur les trois charbonnières expérimentales ici présentées.

Chapitre 4 : Mesurer le rayon de courbure : première étape pour estimer le diamètre des bois charbonnés

Introduction

Les plateformes de charbonnage offrent un excellent matériel pour étudier les anciens massifs forestiers et l'intérêt de développer les approches anthracologiques sur les plateformes de charbonnage a largement été démontré dans le chapitre précédent. Détermination taxonomique et estimation du diamètre des bois charbonnés sur ces sites archéologiques permettent de retrouver la physionomie des massifs forestiers et de travailler sur les modes de gestion sylvicole. Si aujourd'hui les protocoles de prélèvement et d'analyses sont bien établis pour la détermination taxonomique, en revanche, l'estimation du diamètre des bois brûlés, approche relativement récente de l'anthracologie, nécessite encore d'être approfondie. Un projet sur la mise en place de méthodologies propres à l'étude du diamètre des bois a ainsi été initié en 2010 par A. Dufraisse : « *DENDRAC -développement d'outils DENDRométrique appliqués à l'anthrACologie : études des relations Hommes-ressources-environnement* », projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Ce travail s'inscrit dans cette dynamique de recherche, cherchant à affiner les protocoles analytiques pour les contextes de charbonnage.

Etudier le diamètre des bois, nous l'avons vu dans le chapitre 3, nécessite deux étapes fondamentales : d'une part, la mesure du rayon de courbure sur l'ensemble des fragments de charbon de bois et d'autre part, la restitution du diamètre des bois mis au feu. Il s'agit dans le cadre de ce chapitre de se concentrer sur la première étape. En effet, la mesure du rayon de courbure est à l'origine de l'ensemble des interprétations pour retrouver le diamètre des bois brûlés, pourtant cette étape a fait l'objet de très peu d'études.

Mesurer le rayon de courbure, c'est à dire retrouver la distance du charbon par rapport au cœur du bois brûlé, a pendant longtemps été réalisé de façon empirique en utilisant des cibles graduées imprimées sur transparent (Willerding, 1971 ; Schweingruber, 1978 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Nelle, 2002 ; Dufraisse, 2002, 2006), ou en classant les charbons dans trois catégories de courbure de cernes (courbe, intermédiaire, rectiligne) (Marguerie, 1992 ; Marguerie et Hunot, 2007). Ces méthodes de mesures, fortement soumises à l'estimation de l'opérateur, ont progressivement été remplacées par des mesures concrètes à partir de logiciels d'analyse d'images. Depuis 2006, différentes méthodes ont été mises en place, s'appuyant soit sur la morphologie des cernes (Chrzavzez, 2006), soit sur les rayons et notamment sur l'angle formé entre deux rayons (Paradis, 2007 ; Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011 ; Paradis-Grenouillet *et al.*, sous presse).

L'évaluation de la fiabilité des différentes méthodes de mesure a été initiée dans le cadre d'un Master 2 *« étude dendro-anthracologique : une approche méthodologique pour l'étude du calibre des bois »* (Paradis, 2007) sous la direction de Ph. Allée et A. Dufraisse. Ce travail a permis entre autre de mettre en évidence la nécessité de poursuivre ces recherches, tant il est important de bien connaître la fiabilité, la précision de chacune des méthodes de mesure employées, les résultats obtenus étant à la base de toutes les interprétations du diamètre des bois brûlés. Dans le cadre de cette étude, nous avons donc poursuivi nos analyses comparatives sur quatre méthodes de mesure utilisant un logiciel d'analyse d'images.

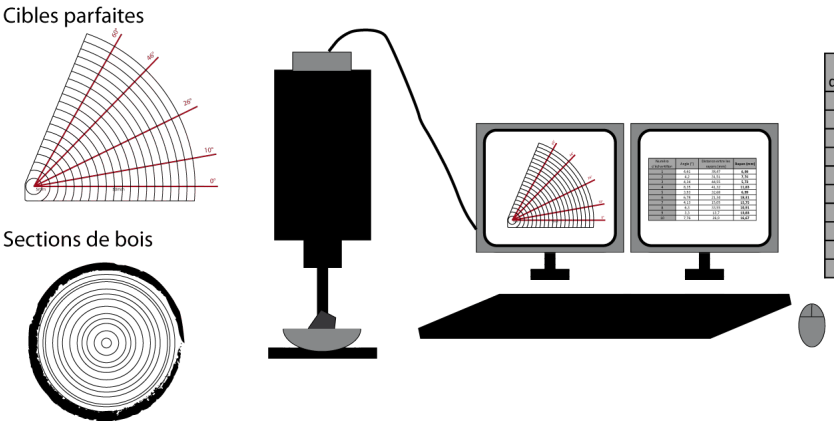
Conduire cette analyse comparative a permis d'établir la fiabilité et les limites de chacune des méthodes existantes, afin de choisir la plus fiable et la plus simple à mettre en œuvre pour l'employer lors des analyses anthracologiques. Mais définir la méthode la plus appropriée est loin d'être suffisant. En effet, hormis « l'outil cercle », aucune autre des trois méthodes de mesure du rayon de courbure n'est préprogrammée dans les logiciels d'analyse d'images. C'est pourquoi, à l'issue de l'analyse comparative nous avons mis en place une application à partir d'un logiciel libre : « *Image J* ». Cette application permet non seulement d'automatiser le calcul du rayon de courbure à partir de la mesure de l'angle et de la distance entre les rayons, mais également d'enregistrer l'ensemble des mesures réalisées. La seconde partie de ce chapitre est donc consacrée à la présentation de cette application et également à l'évaluation de sa fiabilité pour mesurer les rayons de courbure sur des bois et des charbons de bois.

Enfin pour tester la fiabilité de cette méthode de mesure sur un corpus similaire aux contextes des plateformes de charbonnage, nous avons testé la représentativité des spectres dendro-anthracologiques obtenus sur les trois charbonnières expérimentales présentées au chapitre 3. En comparant les proportions de charbon par classe de rayons de courbure avec les proportions de bois mis dans les meules, nous pouvons ainsi évaluer la fiabilité des estimations du diamètre des bois brûlés sur les contextes de charbonnage.

Ce chapitre a donc pour objectif de présenter dans sa globalité la première étape de l'étude du diamètre des bois brûlés, en évoquant d'abord les aspects théoriques, puis la mise en pratique sur un contexte de charbonnage expérimental.

1. Evaluer la fiabilité des différentes méthodes de mesure utilisant un analyseur d'images

Avant de choisir la méthode la plus adaptée pour réaliser les mesures de rayons de courbure sur les corpus anthracologiques de l'expérimentation, il était primordial d'évaluer la précision de chacune des méthodes de mesure utilisant un analyseur d'images, d'en définir leur fiabilité et leurs limites. Ce travail initié tardivement (Paradis, 2007 ; Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011 ; Paradis-Grenouillet *et al.*, sous presse) est indispensable pour l'ensemble des recherches conduites sur l'étude du diamètre des bois.



Numéro d'échantillon	Angle (°)	Distance entre les rayons (mm)	**Rayon (mm)**
1	4,61	38,47	**6,99**
2	4,2	31,51	**7,74**
3	4,34	44,55	**5,73**
4	8,35	41,32	**11,83**
5	3,93	32,68	**6,99**
6	6,78	21,34	**18,31**
7	4,13	15,05	**15,75**
8	6,3	33,55	**10,91**
9	3,3	13,7	**13,83**
10	7,76	26,9	**16,67**

Figure 48 : Schéma de la chaîne opératoire sur les cibles parfaites et les sections de bois

Nous avons ainsi cherché d'une part à évaluer la fiabilité de chaque méthode de mesure sur un matériel d'étude parfait (cibles imprimées sur papier), et d'autre part à mesurer l'influence des variations anatomiques naturellement présentes dans le bois, comme l'ondulation des cernes, la sinuosité des rayons, la présence de bois de compression etc. (figure 48). Ces deux étapes sont particulièrement nécessaires. La première permet de connaître l'erreur liée à l'analyseur d'images et à la formule mathématique employée pour restituer le rayon de courbure ; la seconde, de connaître le potentiel de mesure sur des sections de bois d'essences différentes. Même si au cours des analyses, les fragments visiblement trop déformés sont écartés, aucune section de bois ne présente des cercles parfaits aux rayons très rectilignes. Connaître la capacité des méthodes de mesure à retrouver différentes tailles de rayons de courbure sur un matériel naturel reste donc une étape indispensable pour obtenir l'information la plus fiable possible et ensuite, tenter une restitution du diamètre des bois employés.

1.1. Présentation des différentes techniques de mesure

La généralisation des systèmes d'analyse d'images (caméra ou appareil photo directement fixé sur les loupes binoculaires) a permis le développement des méthodes de mesure du rayon de courbure. A partir de ces équipements, il est possible de travailler directement sur une image du bois ou du charbon de bois ; on peut ainsi dessiner les arcs de cercle formés par les cernes, ou encore des droites représentant les rayons ligneux.

1.1.1. « L'outil cercle »

Les premiers essais de mesure du rayon de courbure ont été réalisés au CEPAM (Culture et Environnements Préhistoire, Antiquité, Moyen Age), UMR 7264, à l'aide du logiciel « Image Pro Plus » avec « l'outil cercle » (Chrzavzez, 2006).En plaçant un certain nombre de points repères sur la limite de cerne, le logiciel extrapole automatiquement un cercle parfait et en calcule le diamètre. Cette méthode est très facile à réaliser et prend peu de temps. Cependant, l'ondulation des cernes de croissance peut être un problème pour la qualité de la mesure.

Afin de s'approcher des méthodes développées par les dendrochronologues présentées dans le chapitre 3, (Norton *et al.*, 1987 ; Rozas, 2003), trois autres méthodes de mesure s'appuyant sur les rayons ligneux ont été mises en place (Paradis 2007; Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011 ; Paradis-Grenouillet *et al.*, sous presse). Elles s'appuient sur des formules géométriques appliquées, cette fois-ci, non plus sur des cercles, mais sur des triangles formés par l'intersection de deux rayons.

1.1.2. Le théorème de Thalès

La première méthode s'appuie sur le Théorème de Thalès qui permet de calculer des rapports de longueur et de mettre en évidence des relations de proportionnalité en présence de parallélisme. En appliquant ce théorème sur le triangle « AOB » formé par le prolongement des rayons (OA) et (OB), avec pour base la corde de l'arc de cercle étudié (AB) (figure 49) et en traçant une droite (CD) parallèle à la base (AB) du triangle, la règle de proportionnalité implique donc que OC/OA = OD/OB = CD/AB. Pour mesurer la distance OA ou OB, il n'est pas possible d'appliquer le théorème de Thalès dans le triangle « AOB ». Il faut donc tracer une nouvelle parallèle (CE), cette fois-ci parallèle au côté OB. Le calcul de proportionnalité se fait donc dans le triangle « OAB » (avec pour base (OB) et sommet A) en s'appuyant sur les droites (CE) et (OB) toutes deux parallèles. Ainsi AC/AO = AE/AB = CE/OB. En mesurant la longueur des segments AE, AB et CE à l'aide de l'analyseur d'images, la longueur du rayon correspondant au rayon de courbure (OB), peut ainsi être facilement calculé. (figure 49).

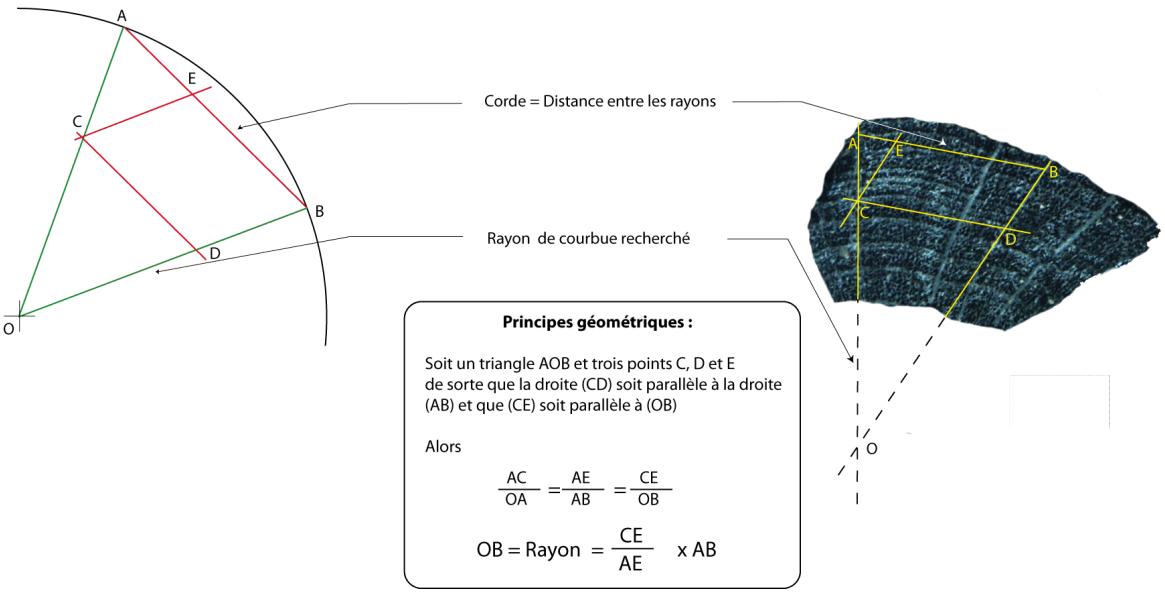


Figure 49 : Explication de la méthode de mesure basée sur le théorème de Thalès

1.1.3. La trigonométrie dans un triangle rectangle

La deuxième méthode s'appuie sur le principe de la trigonométrie dans un triangle rectangle. Il existe deux variantes pour mesurer le rayon de courbure en travaillant dans un triangle rectangle : soit le triangle est inscrit dans le cercle (figure 50), soit l'angle droit est formé par une tangente à l'arc de cercle (figure 51).

a) Dans un triangle inscrit

La première méthode, mise en place par Dufraisse (2011), consiste à tracer deux rayons (OA) et (OB) puis à construire une droite (AC) perpendiculaire au rayon (OB) et passant par A (figure 50). Ainsi par la formule du sinus, le rayon (OA) est facilement calculable en mesurant uniquement la longueur AC et l'angle AOB. Cependant la mise en place de la droite (AC) perpendiculaire à (OB) et passant par A est finalement difficilement applicable à partir de l'analyseur d'images utilisé au laboratoire Géolab (Lucia, Nikon). Ce dernier ne permettant pas de dessiner automatiquement un angle droit, il faut reproduire les tracés à plusieurs reprises pour obtenir un angle à 90°. Il est d'autant plus compliqué de tracer un angle droit passant par le point A. C'est pourquoi nous avons mis en place la seconde méthode, également basée sur un triangle rectangle.

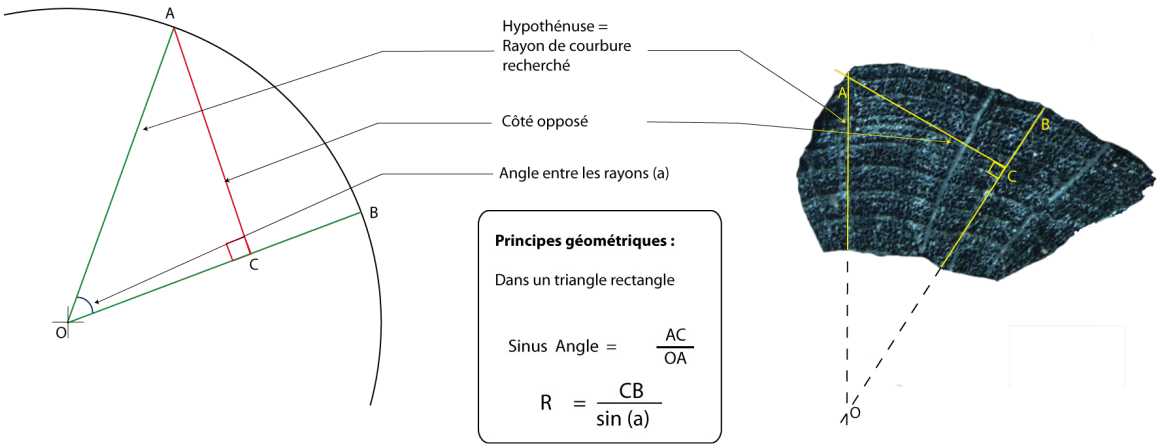


Figure 50 : Explication de la méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle rectangle inscrit dans le cercle.

b) Dans un triangle ayant la corde pour côté opposé

Cette fois-ci, le triangle rectangle est construit en traçant la tangente à l'arc de cercle (BC) et en prolongeant le rayon (OA) jusqu'à croiser la tangente au point C. Sur le triangle rectangle OBC, il est possible de mesurer à la fois l'angle entre les rayons (OA) et (OB) et le segment (BC). La mesure du rayon de courbure est alors calculée à partir de la fonction trigonométrique « tangente » (figure 51)

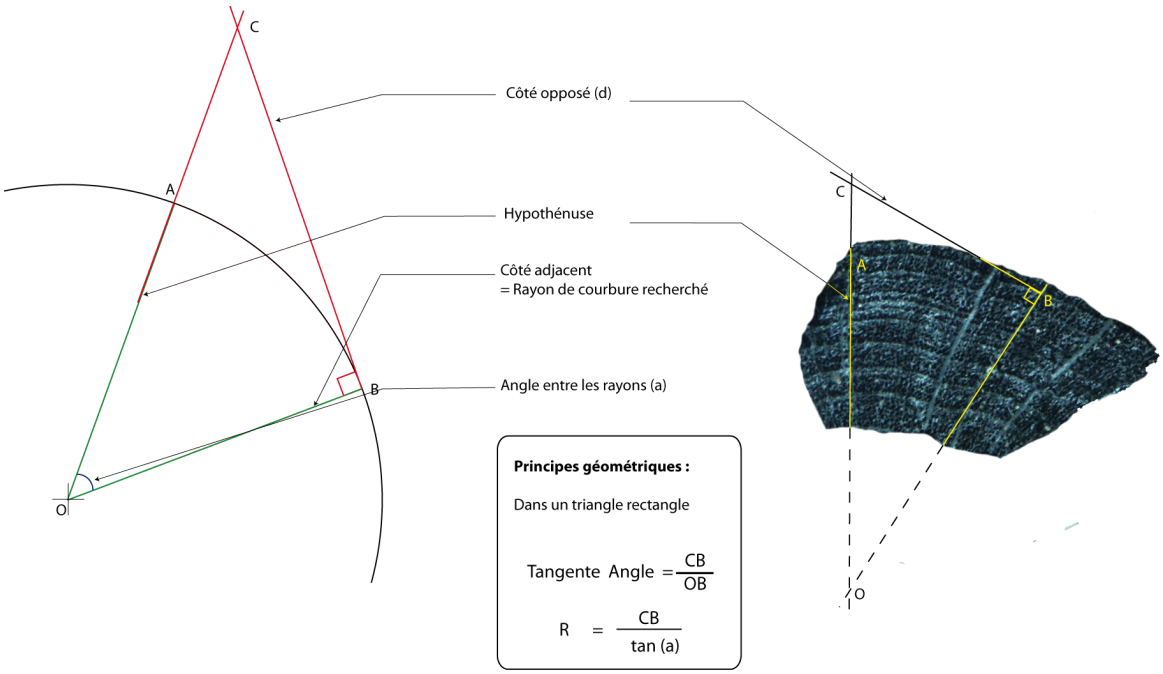


Figure 51 : Explication de la méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle rectangle dont la base est la tangente à l'arc de cercle correspondant au cerne étudié

Dans le cadre de cette étude, seule la méthode utilisant la corde à l'arc de cercle a été utilisée en raison de sa plus grande simplicité à mettre en œuvre à partir de notre analyseur d'images.

1.1.4. La trigonométrie dans un triangle isocèle

La dernière méthode s'appuie sur deux principes. Le premier est celui de « la médiatrice de la corde » : « *La médiatrice de toute corde passe par le centre du cercle* ». Le second est une fonction trigonométrique basée sur le sinus de l'angle.

En traçant deux rayons ligneux, on forme un triangle (AOB) avec pour base la corde de l'arc de cercle (AB) et pour sommet le centre du cercle (O). On considère que le cercle formé par le cerne est un cercle parfait. De ce fait le triangle construit correspond à un triangle isocèle. La médiatrice de la corde coupe donc ce triangle en deux triangles rectangles égaux. Dans un triangle isocèle la médiatrice étant confondue avec la bissectrice, l'angle au sommet est également divisé en deux angles égaux. Avec les logiciels d'analyse d'images, l'angle entre les deux rayons est facilement calculé, ainsi que la longueur de la corde (AB). A partir de ces mesures le calcul du rayon s'effectue à l'aide de la formule trigonométrique du « sinus » (figure 52).

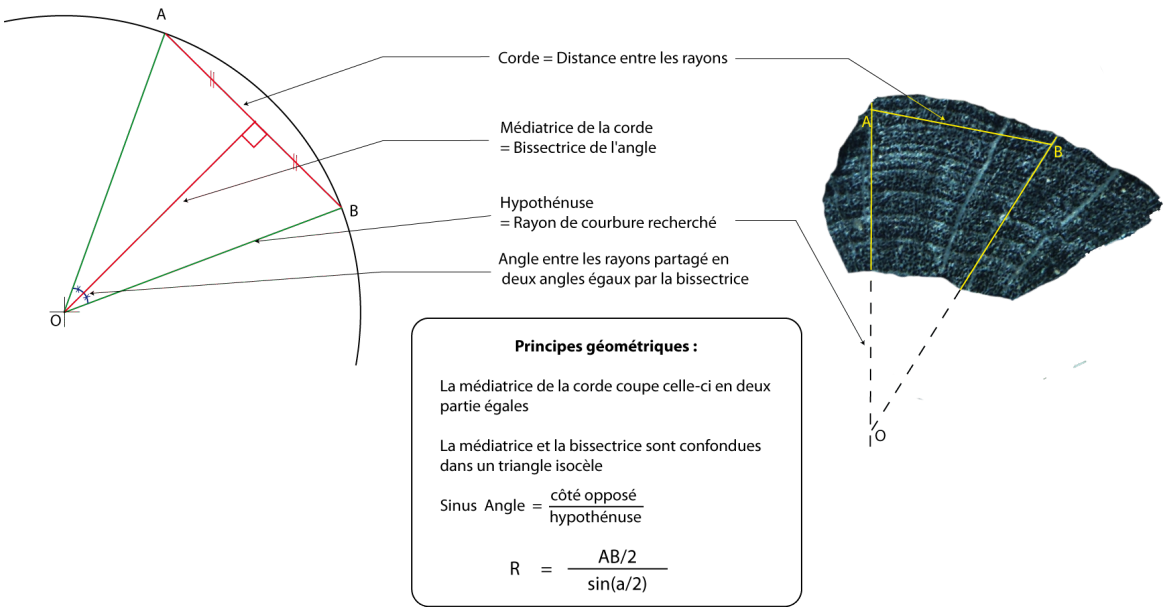


Figure 52 : Explication de la méthode de mesure utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle

1.2. Protocole de mesure

Les quatre méthodes de mesure présentées précédemment ont fait l'objet d'une étude comparative, permettant ainsi de définir la fiabilité et les limites de chacune d'elles. Pour cela les méthodes ont d'abord été testées sur des cibles parfaites, cercles construits à l'aide d'un logiciel de dessin et imprimés sur papier. Dans un second temps, des mesures ont été réalisées sur des rondelles de chêne parfaitement polies afin d'évaluer la variabilité naturelle du bois ajoutant des erreurs lors de la mesure des rayons de courbure.

Pour chaque mesure réalisée, la longueur du rayon de courbure (autrement dit le rayon de courbure) était parfaitement connue, celle-ci a été appelée « rayon théorique » pour les cibles parfaites et « rayon connu » pour les sections de bois. L'écart entre le rayon théorique ou le rayon connu et le rayon mesuré permet ainsi d'estimer la fiabilité de la technique de mesure, d'évaluer l'erreur liée à la mesure et de rechercher les raisons pour lesquelles les mesures peuvent être moins fiables. On peut alors se poser la question de l'influence de la longueur du rayon de courbure sur la précision de la mesure, ou encore de la taille de l'angle ou de la distance entre les rayons. Réfléchir à l'influence que peuvent avoir ces trois paramètres sur la précision de la mesure est fondamental car cela permet de définir les limites de chacune des techniques de mesure. En effet, la question de l'influence de la distance entre les rayons est primordiale pour définir la taille minimale des échantillons pouvant faire l'objet d'une mesure de rayon de courbure. Définir une longueur de rayon de courbure potentiellement mesurable est également à prendre en considération lors des interprétations, en terme de diamètre de bois utilisé. S'il est impossible de mesurer des rayons de courbure de 30 cm par exemple, il sera important d'en tenir compte lors de la restitution du diamètre des bois.
Pour répondre à l'ensemble de ces questions il est indispensable de mettre en place un protocole d'étude adapté, maîtrisant un maximum de paramètres.

1.2.1. Mesures sur des cibles parfaites

Evaluer la précision des quatre techniques de mesure, sans prendre en considération les déformations liées à des variations anatomiques du bois, passe nécessairement par des mesures sur un matériel le plus parfait possible, pour lequel l'ensemble des paramètres

est maîtrisé. Pour cela 236 mesures ont été réalisées sur une trentaine de cibles parfaites, imprimées sur papier. En effet, il a été impossible de réaliser l'ensemble des mesures sur une même cible, nous avons donc construit différentes cibles plus détaillées, principalement pour les angles très ouverts (supérieurs à 10°) ou au contraire pour les angles faibles (inférieurs à 5°). Pour chaque cible la longueur du rayon, l'angle et la distance entre les rayons étaient parfaitement connus (figure 53).

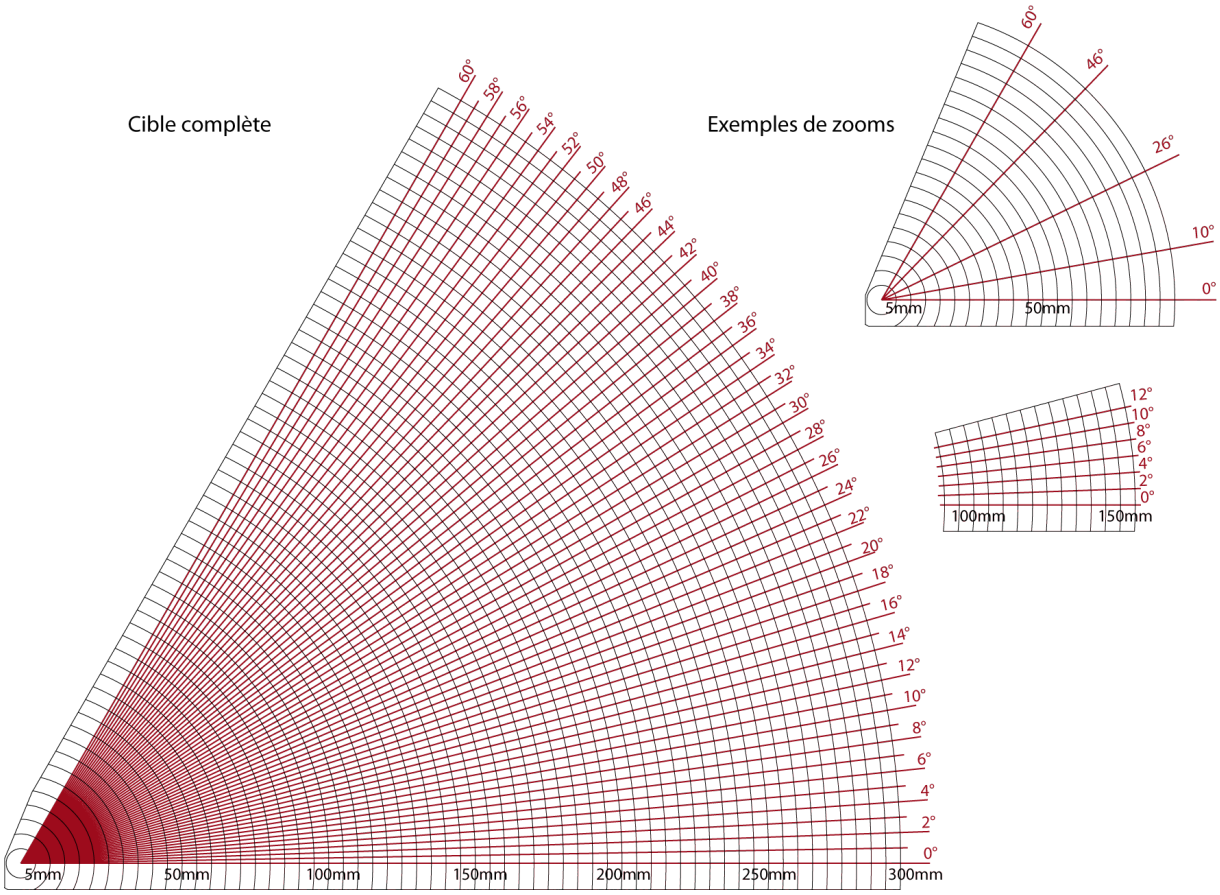


Figure 53 : Exemples de cibles parfaites

Afin d'évaluer l'influence potentielle de ces trois paramètres sur la précision des techniques de mesure, les 236 mesures ont été réalisées en faisant varier les distances et les angles entre les rayons et les longueurs de rayons.

Pour cette étude, en raison du champ de vision restreint de la caméra (environ 25 mm de côté), la distance entre les rayons a été limitée à 25 mm. Nous avons donc fait varier ce paramètre entre 0,5 mm et 25 mm.

En ce qui concerne l'angle entre les rayons, nous avons choisi de travailler sur des angles inférieurs à 60°, car des cibles ayant des angles supérieurs permettaient uniquement de mesurer des rayons de courbures inférieurs à 2 cm, même en utilisant le champ de vision maximal de la caméra (figure 54).

Enfin, les rayons de courbure théoriques s'échelonnent entre 2,5 mm et 150 mm en réalisant au moins dix mesures tous les centimètres.

Si le nombre de mesures est relativement bien réparti en ce qui concerne les longueurs de rayons et les distances entre les rayons, ce n'est pas le cas pour les angles entre les rayons. En effet, plus de 100 mesures ont été réalisées sur des angles compris entre 5 et 10°, car seules ces valeurs d'angles permettent d'obtenir une grande variété de longueurs entre les rayons tout en faisant varier la distance entre les rayons. Les angles très ouverts n'autorisent que des mesures sur de petits rayons de courbure, alors que les angles très faibles (inférieur à 5°) permettent essentiellement la mesure de grands rayons de courbure.

Chaque méthode de mesure a été testée sur 236 emplacements différents sur les cibles parfaites. Pour chaque mesure réalisée, l'opération a été répétée au minimum trois fois afin d'obtenir une valeur moyenne du rayon de courbure mesuré.

1.2.2. Mesures sur des sections de bois polies

Loin des cercles parfaits et des rayons rectilignes dessinés sur papier, le bois présente des « déformations ». Les rayons sont parfois sinueux ; les cernes peuvent être ondulés ; on peut observer des cernes plus ou moins larges, des inversions de l'ondulation de cernes suite à la blessure de l'arbre etc. Pour évaluer l'influence de cette variabilité naturelle sur la précision de la mesure du rayon de courbure, 100 mesures ont été réalisées sur trois sections de chêne polies mesurant 50 cm, 30 cm et 20 cm de diamètre. Les mesures ont été effectuées sur de petites fenêtres d'étude mesurant 4 mm, 10 mm et 25 mm de côté. Ces fenêtres d'étude ont été fixées à l'aide d'une grande feuille de papier dans laquelle des carrés de 4mm, 10 mm et 25 mm ont été découpés. Cela permet ainsi de couvrir l'ensemble de la rondelle de bois afin d'être le plus objectif dans la réalisation des mesures.

Comme pour les cibles parfaites, afin d'avoir un échantillonnage homogène, au moins cinq mesures ont été réalisées tous les centimètres. Le plus petit rayon de courbure mesure 3 mm et le plus grand, 196 mm.
Concernant la distance entre les rayons, la taille du champ de vision de la caméra étant le même que pour les cibles parfaites, la distance maximale entre deux rayons a également

été limitée à 25 mm environ. En revanche, en raison des difficultés à trouver des fenêtres d'étude avec des rayons bien visibles et rapprochés, peu de mesures sur des petites distances entre les rayons ont été réalisées. La plus faible distance entre les rayons est de 2,5 mm et la plus grande de 23 mm.

S'il est possible de contrôler la longueur du rayon ou encore la distance entre les rayons il est impossible de connaître avec précision l'angle entre les rayons. On ne parle pas alors d'angle connu, mais d'angle mesuré. Pour chaque mesure réalisée, la valeur de l'angle a été calculée en moyennant l'ensemble des données obtenues lors de la mesure. Les zones étudiées sur les rondelles de bois ont des angles compris entre 1° et 62°. Mais comme pour les cibles parfaites, l'essentiel des mesures (80 mesures) s'est centré sur des angles inférieurs à 20°.

Enfin, comme pour les cibles parfaites, pour chaque fenêtre d'étude, la mesure a été reproduite au moins trois fois, afin de calculer un rayon de courbure moyen.

Taille maximale de rayon mesurable en fonction de l'angle et de la distance entre les rayons

Distances entre les rayons / Taille de l'angle	25 mm	10 mm	4 mm
45°	32,7 mm	13,1 mm	5,2 mm
25°	57,8 mm	23,1 mm	9,2 mm
10°	143,4 mm	57,4 mm	22,9 mm
5°	286,6 mm	114,6 mm	45,9 mm
2°	716,2mm	286,4mm	114,6mm

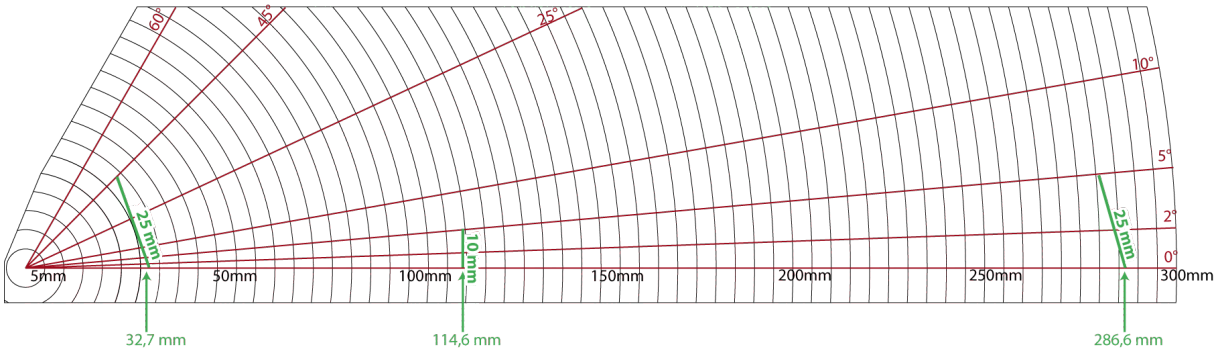


Figure 54 : Explicative de la relation entre la taille maximale des rayons de courbure potentiellement mesurable et la distance entre les rayons

1.3. L'angle, la distance entre les rayons et la longueur du rayon : trois paramètres étroitement liés dans la mesure du rayon de courbure

1.3.1. Une relation décelable à travers les formules géométriques

A travers la présentation des méthodes de mesure et notamment celles utilisant les formules de trigonométrie, nous avons pu constater que la mesure du rayon de courbure était étroitement liée à la mesure de l'angle et de la distance entre les rayons. Cette relation associée au champ de vision restreint de la caméra ou de l'appareil photo peut être à l'origine de quelques limites techniques dans notre analyse. En effet, pour mesurer des rayons de courbure moyens à grands, avec des angles très ouverts il aurait fallu utiliser des distances entre les rayons très importantes, ce qui en l'occurrence n'était pas toujours possible. La majorité des caméras fixées sur les loupes binoculaires n'offre pas un champ de vision plus large que 25 mm^2, ce qui réduit ainsi le potentiel de mesure sur les charbons ayant de grandes sections transversales.

La figure 54 illustre cette relation et explique en partie les limites liées au matériel d'analyse d'images et à l'anatomie des bois. En effet, comme nous travaillons sur des cercles, plus ceux-ci deviennent grands, plus la distance entre deux rayons augmente. Par exemple, un angle de 45°, avec une distance entre les rayons de 25 mm correspond à un rayon de courbure de 32,7 mm. Si l'on réduit la distance entre les rayons à 10 mm, on mesure un rayon de 13,1 mm (figure 54). Au contraire, la gamme de rayons de courbure est beaucoup plus variée lorsqu'on travaille sur des angles inférieurs. Par exemple pour un angle de 5°, avec une distance entre les rayons de 25 mm on peut mesurer un rayon de courbure de 286 mm ; si l'on réduit la distance entre les rayons à 10 mm, on peut alors réaliser des mesures de rayons de courbure jusqu'à 115 mm. Enfin pour une distance entre les rayons de 4 mm la diversité des rayons de courbure est considérablement réduite puisque le rayon maximal potentiellement mesurable est de 46 mm (figure 54).

1.3.2. Quantifier les relations entre angle, distance entre les rayons et longueur du rayon de courbure sur l'ensemble des mesures réalisées

Avant de présenter les résultats des mesures sur cibles parfaites et sur rondelles de bois, nous avons cherché à évaluer l'importance des relations existant entre les trois principaux paramètres sur notre échantillonnage. L'intensité des relations a été calculée à l'aide du coefficient de corrélation de Spearman.

Les résultats montrent que la longueur du rayon de courbure est très faiblement corrélée voire pas du tout à la distance entre les rayons ($r = 0,48$ avec $p < 0,0001$ pour les cibles parfaites, et nulle pour les rondelles de chêne). Il en va de même entre l'angle et la distance entre les rayons (la relation n'est pas significative pour les cibles parfaites et $r = 0,46$ avec $p < 0,0001$ pour les rondelles de chêne).

Par contre à travers l'analyse statistique on observe une corrélation entre l'angle entre les rayons et la longueur du rayon. Les coefficients de corrélation ne sont pas très élevés, puisque sur les cibles parfaites, il est faible ($r = -0,59$ avec $p < 0,001$) et sur les sections de bois il est modéré ($r = - 0,75$ avec $p < 0,001$) mais ils restent cependant significatifs.

Ces relations bien que faibles et modérées s'expliquent relativement bien à partir de la démonstration précédente (cf, 1.3.1). Il sera donc important de tenir compte de cette relation lors de la réalisation des mesures sur les fragments de charbon de bois.

1.4. Résultats bruts et traitement des données

1.4.1. Présentation des résultats

Les résultats bruts peuvent être très facilement comparés selon les techniques de mesure et le type de matériel étudié en observant la différence entre le rayon mesuré (représenté par un point rouge) et le rayon théorique, pour les cibles parfaites et le rayon connu, pour les sections de bois (représenté par un carré noir) (figure 55). Afin d'indiquer l'hétérogénéité des mesures réalisées, nous avons également ajouté la barre d'erreur indiquant l'amplitude des mesures obtenues lors de l'analyse. Pour simplifier la lecture, les données ont été classées par ordre croissant de longueur de rayon.

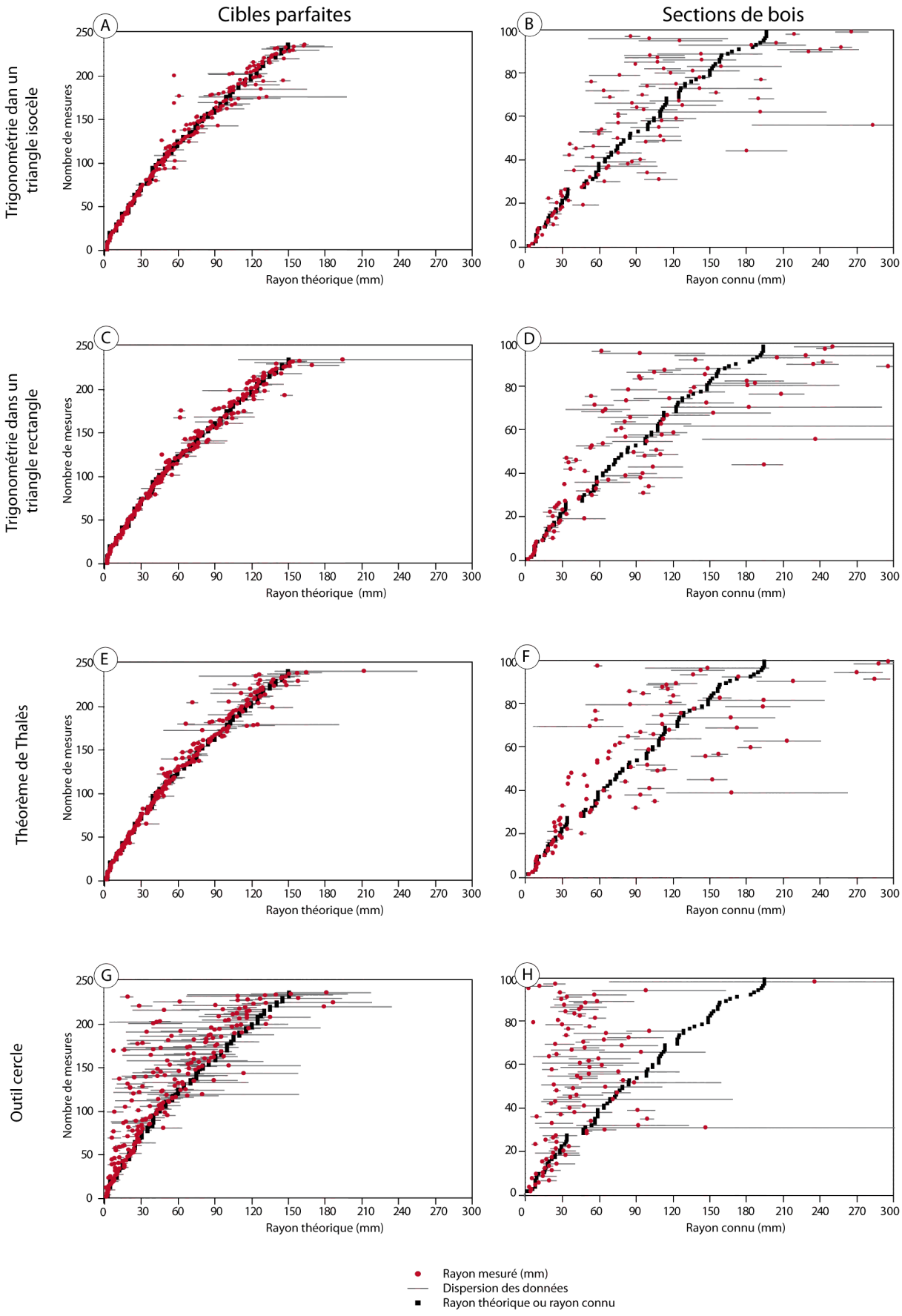


Figure 55 : Comparaison des mesures réalisées sur les cibles parfaites et les sections de bois polies avec les longueurs de rayons théoriques et connus.

A l'issue de cette analyse nous pouvons constater que les trois méthodes s'appuyant sur les rayons (basées sur la trigonométrie dans un triangle rectangle ou un triangle isocèle ou encore sur le théorème de Thalès) se distinguent très nettement de « l'outil cercle ». Sur les cibles parfaites, la dispersion autour de la moyenne est relativement faible pour les trois méthodes s'appuyant sur les rayons alors que les résultats obtenus avec « l'outil cercle » présentent une dispersion des mesures beaucoup plus importante. Les rayons mesurés sont très souvent inférieurs au rayon théorique.

Cette différence est d'autant plus nette pour les résultats obtenus sur les sections de bois. La dispersion est plus importante sur l'ensemble des méthodes de mesure, néanmoins on observe tout de même une meilleure concordance entre les rayons mesurés et les rayons connus pour les méthodes s'appuyant sur l'angle entre les rayons, que les résultats obtenus à partir de « l'outil cercle ». En effet, ces derniers sont systématiquement très éloignés de la valeur du rayon connu, et souvent nettement inférieurs. Cette méthode, basée sur la morphologie des cernes semble ne pas pouvoir mesurer des rayons de courbure supérieurs à 6 cm. En effet, sur les 100 mesures réalisées sur les sections de bois, seules 16 rayons de courbure présentent des valeurs supérieures à 6 cm, alors qu'ils le sont pour la moitié des rayons connus.

Ces observations sur les données brutes permettent une rapide estimation du potentiel de ces quatre méthodes. Si les trois méthodes s'appuyant sur les formules géométriques présentent des résultats tout à fait cohérents, en revanche, compte tenu des mauvais résultats obtenus pour « l'outil cercle » cette méthode doit donc être proscrite lors de la mesure du rayon de courbure.

Afin de connaître les avantages et les limites de chacune de ces méthodes il est nécessaire d'entrer un peu plus dans le détail et traiter les données afin de pouvoir comparer la fiabilité de la mesure sur différentes gammes de rayons de courbure, d'angles et de distances entre les rayons.

1.4.2. Traitement des données

a) Travailler sur des valeurs relatives plutôt que sur des valeurs absolues

La comparaison entre rayons mesurés et rayons théoriques (ou rayons connus pour les sections de bois) permet d'avoir une première image du potentiel et de la qualité des mesures des différentes méthodes. En revanche, ces données brutes et notamment la dispersion autour de la valeur moyenne mesurée peuvent induire un biais dans l'interprétation. En valeur absolue, les écarts entre le rayon mesuré et le rayon connu (marge d'erreur appelée delta (Δ)) semblent beaucoup plus importants sur les grands rayons de courbure que sur les petits (figure 56) ; or, si l'on rapporte cette marge d'erreur à la longueur du rayon on se rend compte que les pourcentages d'erreur sont peu différents entre les petits et les grands rayons de courbure. Il est donc important de travailler sur des valeurs relatives des écarts.

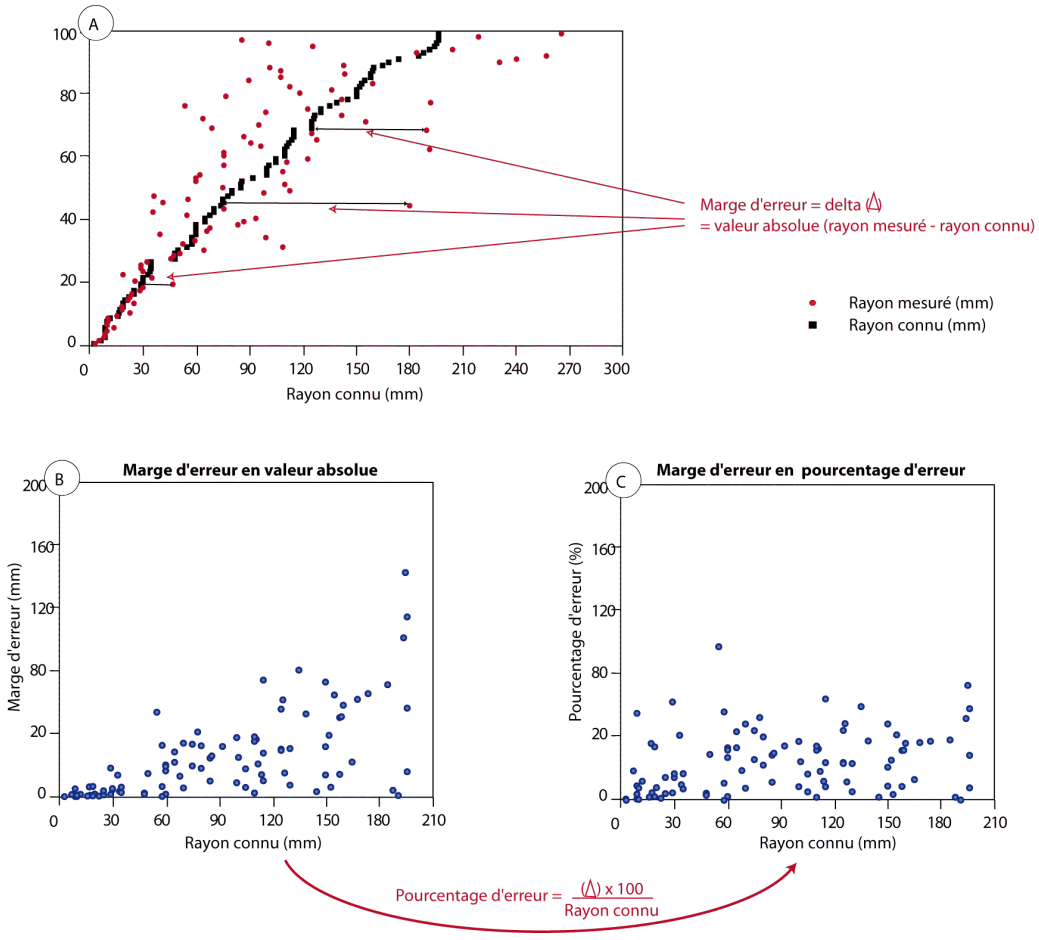


Figure 56 : Représentation de l'erreur associée à la mesure en valeur absolue (A) et en valeur relative (B), l'exemple des mesures réalisées avec la méthode de trigonométrie dans un triangle isocèle sur les sections de bois

Prenons l'exemple des mesures réalisées sur les sections de bois à partir de la méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle (figure 56). Sur le graphique (a) représentant l'évolution de la marge d'erreur en valeur absolue, on remarque aisément une nette évolution avec des valeurs plus importantes pour les plus grands rayons de courbure que pour les plus petits. En revanche, sur le graphique (b) représentant cette fois-ci la marge d'erreur en valeur relative, c'est à dire en calculant le pourcentage d'erreur, on constate que les valeurs sont aussi importantes pour les petits rayons de courbure que pour les plus grands. Il est donc préférable de travailler sur les pourcentages d'erreur plutôt que sur les valeurs absolues.

b) Etablir des classes de fiabilité

En représentant le pourcentage d'erreur par une courbe cumulée croissante (figure 57), nous pouvons facilement observer la proportion de mesures ayant de faibles ou de forts pourcentages d'erreur pour chacune des méthodes.

Une fois encore, les résultats obtenus avec « l'outil cercle » se différencient nettement, la courbe d'évolution des pourcentages d'erreur est très en deçà des résultats obtenus à partir des trois autres méthodes de mesure sur les cibles parfaites comme sur les sections de bois.

A partir des graphiques (figure 57), nous avons pu établir quatre classes de fiabilité. Pour conduire l'analyse, il s'agissait de fixer des bornes applicables à la fois sur les résultats obtenus sur les cibles parfaites et sur les sections de bois. Or, les courbes cumulatives croissantes des pourcentages d'erreur évoluent différemment sur les cibles parfaites et sur les sections de bois. Nous avons donc choisi des bornes sur des déciles qui encadrent bien les ruptures de pente des courbes.

Les deux classes suivantes ont été établies en fonction des courbes d'évolution du pourcentage d'erreur obtenues sur les sections de bois. Nous avons considéré que jusqu'à 40 %, rupture visible sur les courbes d'évolution du pourcentage d'erreur des trois méthodes s'appuyant sur l'angle entre les rayons, les valeurs sont considérées comme « moyennement fiables ». Enfin au delà de 40 % d'erreur, les mesures sont alors considérées comme « peu fiables », insatisfaisantes pour conduire une étude précise du diamètre des bois.

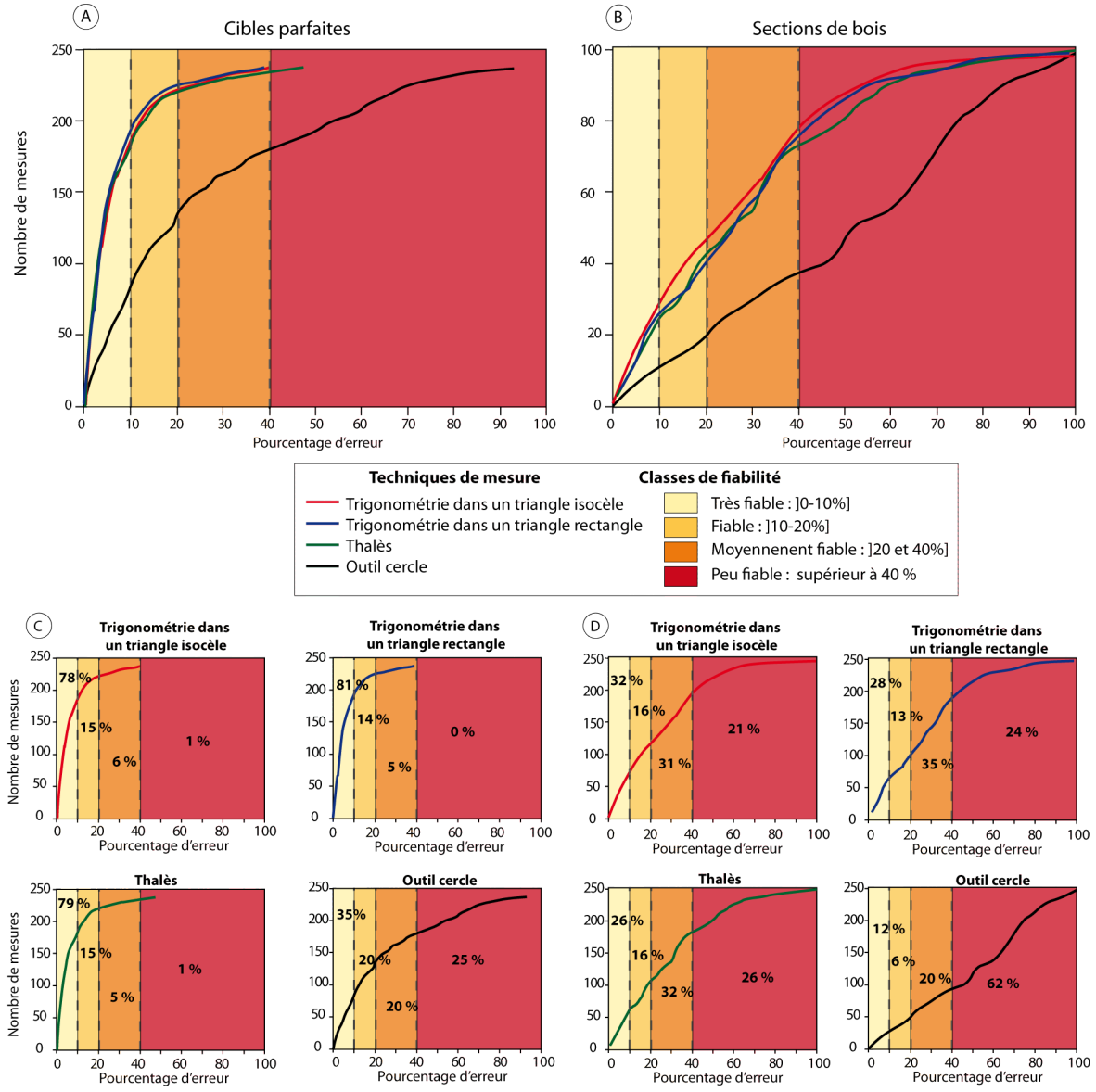


Figure 57 : Evolution des pourcentages d'erreur en fonction du nombre de mesures réalisées à partir des quatre méthodes sur les cibles parfaites (A et C) et sur les sections de bois (B et D).

A partir de ces classes de fiabilité nous avons pu quantifier la part de mesures « très fiables » pour chaque méthode ; ce qui renforce encore la différence entre les données obtenues sur les trois méthodes s'appuyant sur les rayons et « l'outil cercle ». En effet, celui-ci ne présente que 35 % de mesures « très fiables » sur les cibles parfaites alors que les trois autres méthodes en présentent près de 80 % (figure 57, C).

Les résultats obtenus sur les sections de bois sont un peu moins satisfaisants (figure 57 B et D), mais la différence entre « l'outil cercle » et les trois autres méthodes est toujours

aussi nette. La méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle présente par contre les meilleurs résultats avec 32 % de données « très fiables » et 16 % de données « fiables ». On retrouve également d'importantes proportions de données « moyennement fiables » avec 31 %. Cette méthode, ainsi que les deux autres s'appuyant sur les rayons sont nettement plus fiables que « l'outil cercle », qui présente de nombreuses mesures « peu fiables » : 62 %.
A travers cette démonstration, on constate que « l'outil cercle » n'est pas suffisamment fiable pour développer une étude précise du diamètre des bois brûlés.

c) Etudier les facteurs pouvant augmenter le pourcentage d'erreur des mesures

Ces classes de fiabilité nous permettent non seulement d'évaluer la part de mesures « peu fiables » pour chaque méthode de mesure, mais elles permettent également d'étudier l'influence de l'angle, de la distance entre les rayons et de la longueur du rayon sur la fiabilité de la mesure.

Chaque paramètre a donc été étudié séparément pour analyser avec précision si des conditions extrêmes, comme des angles faiblement ouverts ou de grandes longueurs de rayon de courbure, pouvaient conduire à une augmentation de mesures « peu fiables ».

Dans un premier temps, afin d'identifier s'il existait une relation entre le pourcentage d'erreur et chacun des paramètres précédemment cités, nous avons calculé les coefficients de corrélation. Ce dernier permet de quantifier statistiquement l'intensité de la relation entre l'angle, la distance entre les rayons et la longueur du rayon avec le pourcentage d'erreur obtenu sur la mesure.

Dans un second temps, pour étudier la répartition des mesures par classes de fiabilité en fonction de l'évolution de chacun des paramètres, nous avons procédé à une discrétisation des trois paramètres en sept classes.
Les angles ont été subdivisés de la façon suivante :] 0-1°],]1-2°],]2-4°],]4-8°],]8-16°],]16-32°] et supérieurs à 32°. Les classes ont été très resserrées sur les petits angles car nous souhaitions étudier de près la déformation liée à l'analyse de fragments dont les rayons sont quasiment parallèles.

Les distances entre les rayons ont également fait l'objet d'une discrétisation plus resserrée sur les petites distances entre les rayons. Nous proposons ainsi les classes suivantes :] 0-2 mm],]2-4 mm],]4-6 mm],]6-10 mm],]10-15 mm],]15-20 mm] et supérieures à 20 mm. La limite de 4 mm a été choisie pour la deuxième classe, en fonction de la taille minimale des charbons communément étudiés en contexte archéo-anthracologique (Chabal, 1992, 1997).

Enfin les classes de rayons de courbure sont :] 0-2,5 cm],]2,5-5 cm],]5-7,5cm],]7,5-10 cm],]10-12,5cm],]12,5-15cm] et supérieurs à 15 cm.
Pour chaque paramètre, le nombre de mesures par classe a été comptabilisé et réparti selon les quatre classes de fiabilité précédemment établies.

Cette étude très approfondie a permis de définir de façon concrète les facteurs engendrant des erreurs importantes sur la mesure, et pour lesquels il conviendra d'être très vigilant lors des mesures sur des charbons archéologiques.

1.5. L'angle entre les rayons, un paramètre influençant la précision de la mesure

Sur les cibles parfaites comme sur les rondelles de bois, l'intensité de la relation entre l'angle et le pourcentage d'erreur a été calculée à l'aide du coefficient de corrélation de Spearman. Les résultats obtenus montrent des relations faibles à modérées mais néanmoins significatives ($p < 0,0001$) (figure 58). Par ailleurs, l'étude détaillée de la répartition des pourcentages d'erreur en fonction des classes d'angles met bien en évidence le lien étroit entre les angles faiblement ouverts et les mesures considérées comme « peu fiables ».

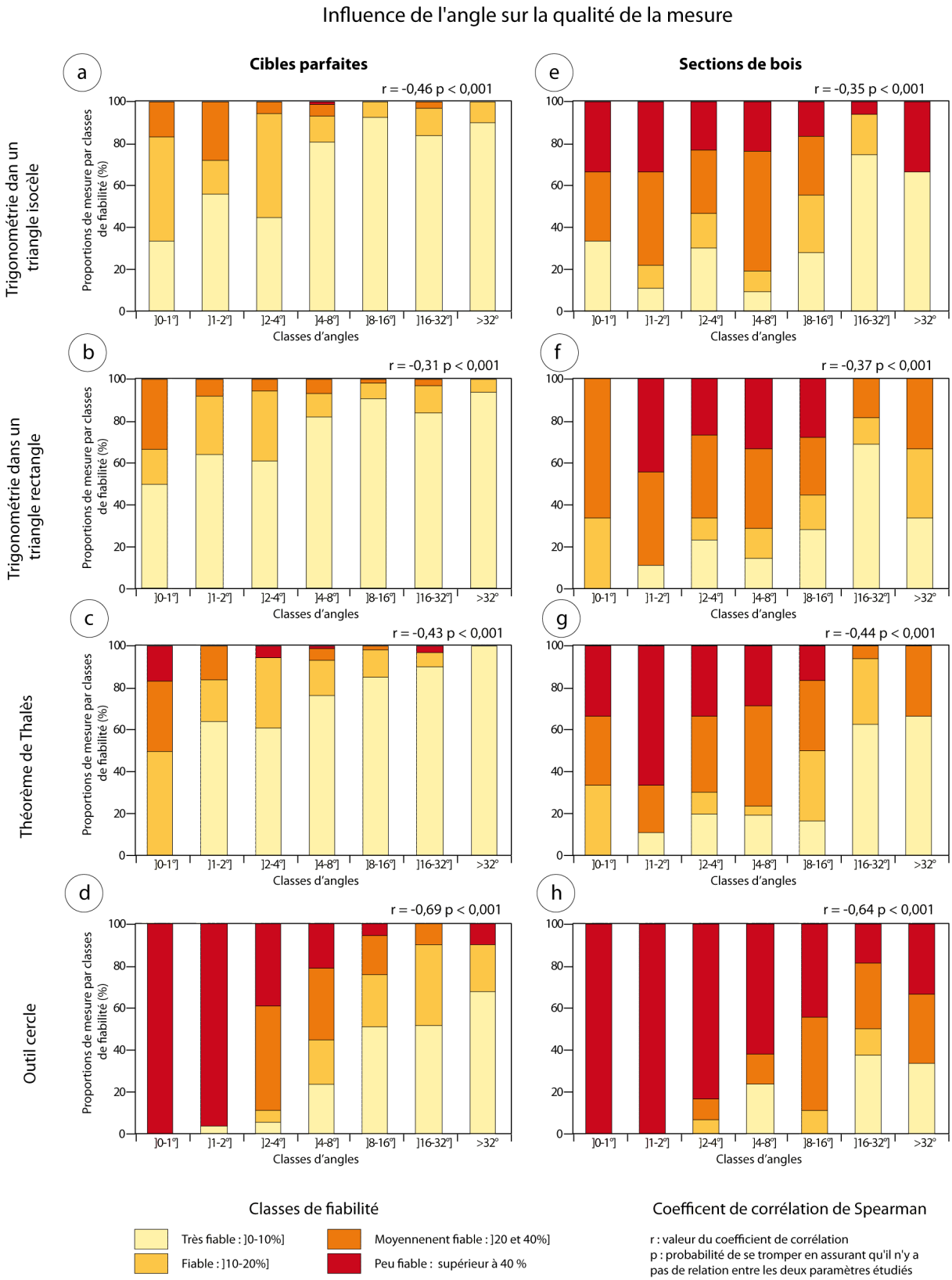


Figure 58 : Mise en évidence de l'influence de l'angle sur la précision de la mesure. Sur les graphiques sont représentées les proportions de mesures par classes de fiabilités sur sept classes d'angles entre les rayons.

1.5.1. De très bons résultats sur les angles ouverts (supérieurs à 8°)

A la lecture des graphiques de la figure 58 on peut observer de très bons résultats sur les angles ouverts et cela est d'autant plus remarquable sur les mesures réalisées sur les cibles parfaites. En effet, les angles supérieurs à 4° présentent plus de 80 % de mesures « très fiables » suivis d'environ 10 % de données « fiables ». Ces très bons résultats ne sont valables que pour les trois méthodes s'appuyant sur les rayons. En effet, « l'outil cercle » présente des proportions de mesures « très fiables » et « fiables » beaucoup plus faibles, avec seulement 24 % pour la classe] 4 - 8°], 51 % pour la classe] 8 - 16°], 52 % pour la classe]16 -32°]. Il semble que les mesures obtenues avec cette méthode ne soient fiables que sur les échantillons ayant des angles supérieurs à 8°.

Les résultats obtenus sur les sections de bois mettent également en évidence l'importante différence entre « l'outil cercle » et les trois autres méthodes. Nous l'avons vu précédemment, pour étudier la fiabilité de la mesure à partir des résultats obtenus sur les sections de bois nous ne pouvons pas seulement nous appuyer sur les données « très fiables » et fiables », nous prenons l'ensemble des mesures ayant des pourcentages d'erreur inférieurs à 40 %. On constate alors que les trois méthodes utilisant les rayons présentent plus de 75 % de mesures ayant des pourcentages d'erreur inférieurs à 40 % sur les classes d'angles supérieures à 8°, ce qui est loin d'être le cas pour « l'outil cercle » qui n'en présente qu'un peu plus de 50 %. « L'outil cercle » offre uniquement des résultats satisfaisants pour des angles supérieurs à 16° et malgré des angles très ouverts, les proportions de mesures « très fiables » et « fiables » restent relativement faibles avec seulement 50 % des données dans la classe]16° - 32°] et 33 % pour les angles supérieurs à 32 °.

1.5.2. Les angles faiblement ouverts (inférieurs à 4 °), une vigilance nécessaire lors des mesures

A l'issue de cette analyse on constate que les angles faiblement ouverts présentent un plus grand nombre de mesures « moyennement et peu fiables ».
Sur les cibles parfaites, les méthodes utilisant la trigonométrie présentent des proportions de mesures « moyennement fiables » plus importantes dans les classes d'angles inférieures à 2°, mais cela reste tout de même dans des proportions acceptables car elles sont toujours

inférieures à 30 % (figure 58, a et b). En revanche, la méthode basée sur le théorème de Thalès présente des proportions « moyennement fiables » et « peu fiables » plus importantes dans la classe]0-1°] avec respectivement 33 et 16 % (figure 58, c). De plus, dans cette classe d'angles, on ne retrouve aucune mesure « très fiables ». Ces résultats mettent en évidence un risque plus important d'erreur sur les mesures réalisées à l'aide de la méthode basée sur le théorème de Thalès pour les angles inférieurs à 1°, contrairement aux deux méthodes basées sur la trigonométrie. Mais comparée aux résultats obtenus par « l'outil cercle », la méthode basée sur le théorème de Thalès est bien plus fiable sur les angles inférieurs à 4°. En effet, « l'outil cercle » présente 100 % de données « peu fiables » dans la classe] 0-1°], 95 % dans la classe]1-2°] et près de 40 % dans la classe]2-4°].

Si l'on regarde les résultats obtenus sur les sections de bois on observe une augmentation des proportions de mesures « moyennement et peu fiables », et cela est particulièrement visible sur les classes d'angles inférieurs à 4°. Cette fois-ci, la méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle rectangle présente les résultats les plus satisfaisants, avec 66 % de données au moins « moyennement fiables » pour la classe] 0-1°] (figure 58, f). En revanche, cette méthode ne présente aucune donnée « très fiables » contrairement à la méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle (figure 58, e). En effet, cette dernière présente certes 33 % de données « peu fiables » mais on retrouve également 33 % des mesures qui sont « très fiables ».
Finalement, les proportions de données « moyennement et peu fiables » identifiées sur les angles faiblement ouverts obtenus sur les trois méthodes s'appuyant sur les rayons sont insignifiantes comparées aux résultats obtenus avec « l'outil cercle ». En effet, cette méthode présente 100 % de mesures « peu fiables » dans les classes] 0-1°] et]1-2°] et plus de 80 % dans la classe]2-4°].

L'angle semble donc jouer un rôle non négligeable sur la qualité des mesures réalisées ; quelle que soit la méthode de mesure choisie, les angles faiblement ouverts, principalement ceux inférieurs à 2°, sont à l'origine d'un plus grand nombre d'erreurs sur la mesure. Ces observations amènent à se poser la question de la conservation des mesures ayant des angles trop faibles (inférieur à 2°). A. Dufraisse et M.S. Garcia-Martinez ont également mis en évidence la part de mesures « peu fiables » très importantes sur les angles inférieurs à 3 ° sur le pin et de 2° pour le hêtre. Les auteurs préfèrent retirer toutes les mesures ayant des

angles inférieurs pour éviter d'intégrer des erreurs à l'analyse du diamètre des bois brûlés (Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011).

Dans le cadre de cette étude, nous avons écarté l'ensemble des mesures ayant des angles inférieurs à 2° pour calculer les coefficients de corrélation permettant de mesurer l'intensité de la relation entre l'angle et le pourcentage d'erreur. Les résultats obtenus montrent une nette diminution des coefficients de corrélation qui deviennent même non significatifs pour les trois méthodes s'appuyant sur les rayons. En revanche, pour que l'intensité de la relation entre l'angle et le pourcentage d'erreur soit nulle pour « l'outil cercle », il faudrait retirer l'ensemble des mesures ayant des angles inférieurs à 6°, ce qui élimine une grande partie des données. Ces résultats montrent à nouveau combien il est difficile d'utiliser « l'outil cercle » pour mesurer des rayons de courbure.

Compte tenu de nos précédentes observations, nous savons combien la longueur du rayon de courbure est liée à la valeur de l'angle mesuré. Nous l'avons vu, les angles faiblement ouverts permettent davantage de mesurer de grands rayons de courbure que les plus faibles. Il nous semble donc intéressant d'enregistrer également les charbons présentant des angles inférieurs à 2°, en étant toutefois très attentif lors de la mesure. Afin d'éviter d'intégrer des mesures faussées dans l'analyse du diamètre des bois nous reproduisons la mesure un grand nombre de fois afin de s'assurer de la bonne représentativité des angles mesurés. Lorsque, malgré la répétition, les rayons de courbure calculés sont très différents les uns des autres alors la mesure n'est pas prise en considération. En revanche, nous proposons d'indiquer les raisons pour lesquelles la mesure n'a pas pu être réalisée (angle trop faible rendant la mesure délicate par exemple). Si à l'issue de l'analyse de l'ensemble du corpus anthracologique cela s'est reproduit à de nombreuses reprises, cela peut être un indicateur de présence de grands rayons de courbure, donc de bois de plus gros diamètre.

1.6. La distance entre les rayons, un moyen d'établir la taille minimale des échantillons à analyser

Définir l'influence de la distance entre les rayons est importante à étudier car elle permet d'établir la taille minimale des échantillons pouvant faire l'objet d'une mesure de rayon de courbure. Pour cela nous avons procédé de la même manière que pour établir l'influence de l'angle sur la mesure, avec dans un premier temps, un calcul statistique permettant d'évaluer la relation entre le pourcentage d'erreur et l'évolution de la distance entre les rayons et dans un deuxième temps une analyse détaillée de la répartition des pourcentages d'erreur par classes de distances entre les rayons.

Sur les cibles parfaites, les coefficients de corrélation sont faibles (« r » compris entre -0,35 et -0,54 avec $p < 0,0001$) (figure 59 a,b,c,d). Par ailleurs, les calculs réalisés sur les données provenant de mesures sur les sections de chêne présentent des coefficients de corrélation encore plus faibles (« r » compris entre -0,22 et -0,36) (figure 59 e,f,g,h). Cette différence s'explique par un plus faible nombre de mesures sur des petites distances entre les rayons pour les rondelles de chêne. En effet, il était plus difficile de trouver des fenêtres d'étude présentant des rayons bien visibles et très rapprochés. Pour évaluer la distance minimale entre les rayons, il est donc préférable de s'appuyer sur les résultats obtenus sur les cibles parfaites.

Si on observe finalement peu de différences entre les quatre techniques de mesures à partir du calcul des coefficients de corrélation, l'analyse des graphiques représentant la répartition de l'erreur associée en fonction des classes de distance entre les rayons (figure 59) permet néanmoins d'en identifier quelques unes.

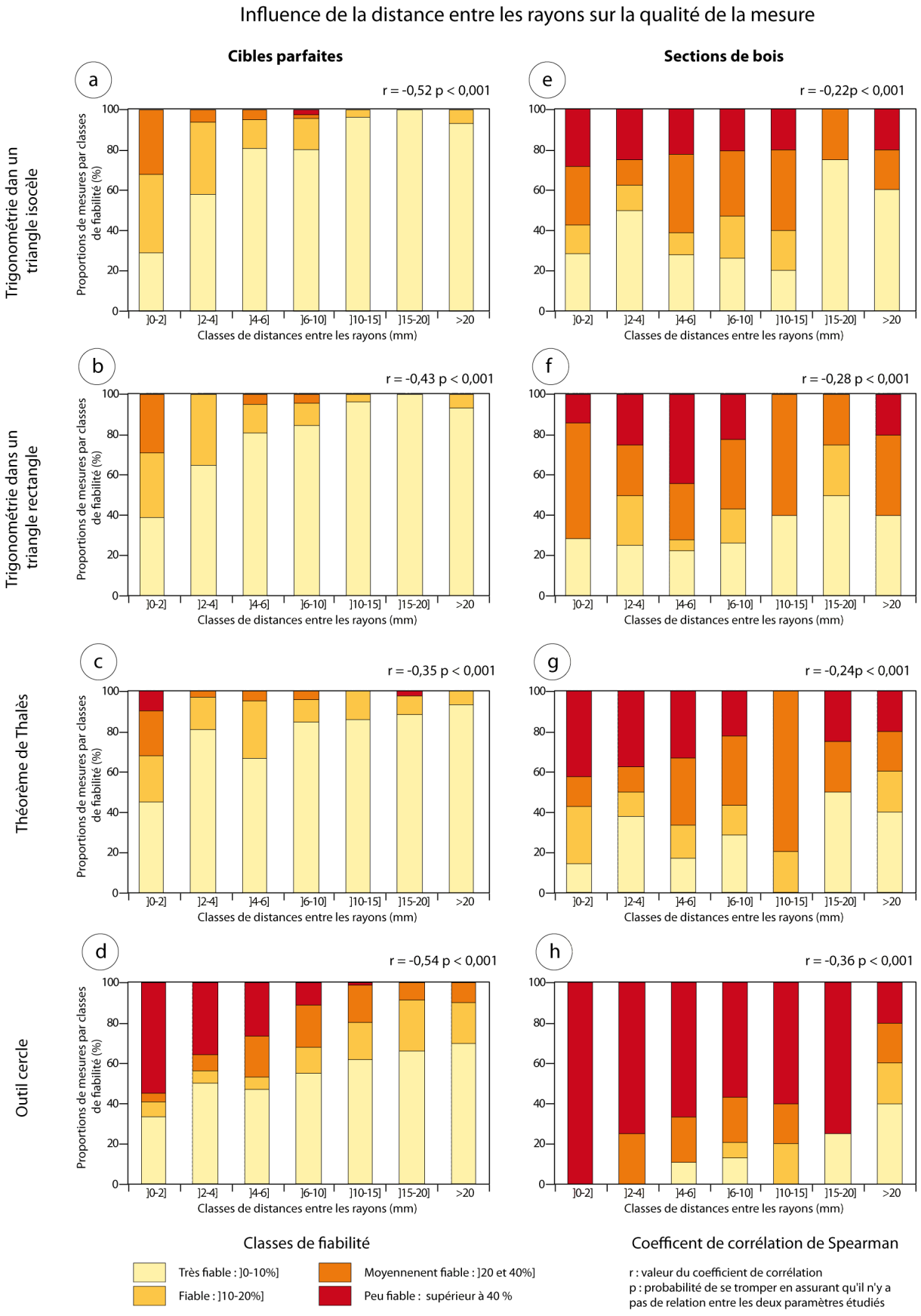


Figure 59 : Evaluation de l'influence de la distance entre les rayons sur la précision de la mesure.

1.6.1. De bons résultats sur les distances entre les rayons supérieurs à 4mm

A la lecture des résultats obtenus sur les cibles parfaites (figure 59, a, b, c, d), on observe une bonne fiabilité de l'ensemble des méthodes de mesures sur les distances entre les rayons supérieures à 4 mm. En effet, sur ces classes, les proportions de mesures « très fiables » sont supérieures à 65 %, sauf pour « l'outil cercle » qui présente des valeurs comprises entre 47 et 66 %.

Sur les sections de bois, les proportions de mesures « très fiables » et « fiables » sont largement plus faibles, quelle que soit la méthode de mesure employée (figure 59, e, f, g, h). Nous pouvons tout de même mettre en évidence une fois encore la différence avec les résultats obtenus avec « l'outil cercle ». En effet, ce dernier présente des mesures « peu fiables » allant de 100 % dans la classe] 0-2 mm] à 20 % dans la classe « > 20 mm » (figure 59, h).

1.6.2. Définir la distance minimale potentiellement mesurable

A l'issue de cette analyse on observe de bons résultats sur les grandes distances entre les rayons. Seules les distances entre les rayons inférieures à 4 mm présentent des proportions de mesures « moyennement et peu fiables » plus importantes. Mais il nous est difficile d'établir une distance minimale entre les rayons à partir des données obtenues sur les sections de bois, du fait d'un nombre trop faible de mesures sur les petites et les grandes distances entre les rayons. De ce fait, seules les données obtenues sur les cibles parfaites permettent d'envisager cette analyse.

Les trois méthodes utilisant les rayons présentent un nombre de mesures « peu fiables » et « moyennement fiables » plus important sur les petites distances entre les rayons, notamment sur la classe] 0-2 mm]. Afin d'éviter d'introduire de fausses mesures dans l'analyse du diamètre des bois, il est préférable d'écarter les échantillons présentant un écart entre les rayons inférieurs à 2 mm. Cette limite n'est finalement pas une contrainte importante pour les études en archéo-anthracologie, puisque les échantillons étudiés mesurent généralement entre 4 et 8 mm en section transversale. En ce qui concerne « l'outil cercle », la distance minimale entre les rayons est évaluée sur les « cibles parfaites » à 6

mm mais si l'on regarde les résultats obtenus sur ces cibles, même les mesures ayant des distances entre les rayons comprises entre 15 et 20 mm présentent plus de 70 % de mesures « peu fiables ». Nous pouvons ici prendre ces données en considération, car cette classe contient une quinzaine de mesures. Cela signifie donc que pour obtenir des données fiables à partir de cet outil il faudrait avoir des sections transversales supérieures à 20 mm, ce qui est rarement le cas sur les corpus anthracologiques.

1.7. Définir la taille maximale des rayons de courbure mesurables

Pour aller au bout de l'analyse, il convient de tester maintenant la taille maximale des rayons de courbure que chaque méthode de mesure peut retrouver. A savoir si les petits ou grands rayons de courbure présentent des pourcentages d'erreur équivalents.

Les résultats présentés dans la figure 60 montrent une fois encore un écart important entre les trois techniques de mesure s'appuyant sur les rayons et « l'outil cercle », mais également des différences importantes entre les résultats obtenus sur les cibles parfaites et ceux obtenus sur les sections de chêne.

Avant de présenter le potentiel de mesure de chacune des méthodes, il nous semble d'abord nécessaire d'étudier la relation qui existe entre le pourcentage d'erreur et la longueur du rayon de courbure à partir des coefficients de corrélation. Les résultats obtenus sont très différents sur les cibles parfaites et sur les rondelles de bois. En effet, si les cibles parfaites ne présentent pas de relations significatives, en revanche les données obtenues sur les rondelles de bois en présentent une ($r = 0,29$ pour la technique utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle, 0,31 pour celle utilisant la trigonométrie dans un triangle rectangle, 0,36 pour le théorème de Thalès et 0,59 pour « l'outil cercle » avec $p < 0,001$). La mise en évidence d'une corrélation, certes faible mais significative, sur les rondelles de bois et non sur les cibles parfaites s'explique par un plus grand nombre de mesures sur des rayons de courbure mesurant jusqu'à 19 cm pour les rondelles de bois, alors que le rayon maximal mesuré sur les cibles parfaites était de 15 cm. Voici donc un indice mettant en évidence une augmentation des pourcentages d'erreur pour les très grands rayons de courbure.

A la lecture des coefficients de corrélation on peut observer que « l'outil cercle » présente la relation la plus forte ; il est donc intéressant de bien distinguer cette méthode des trois autres.

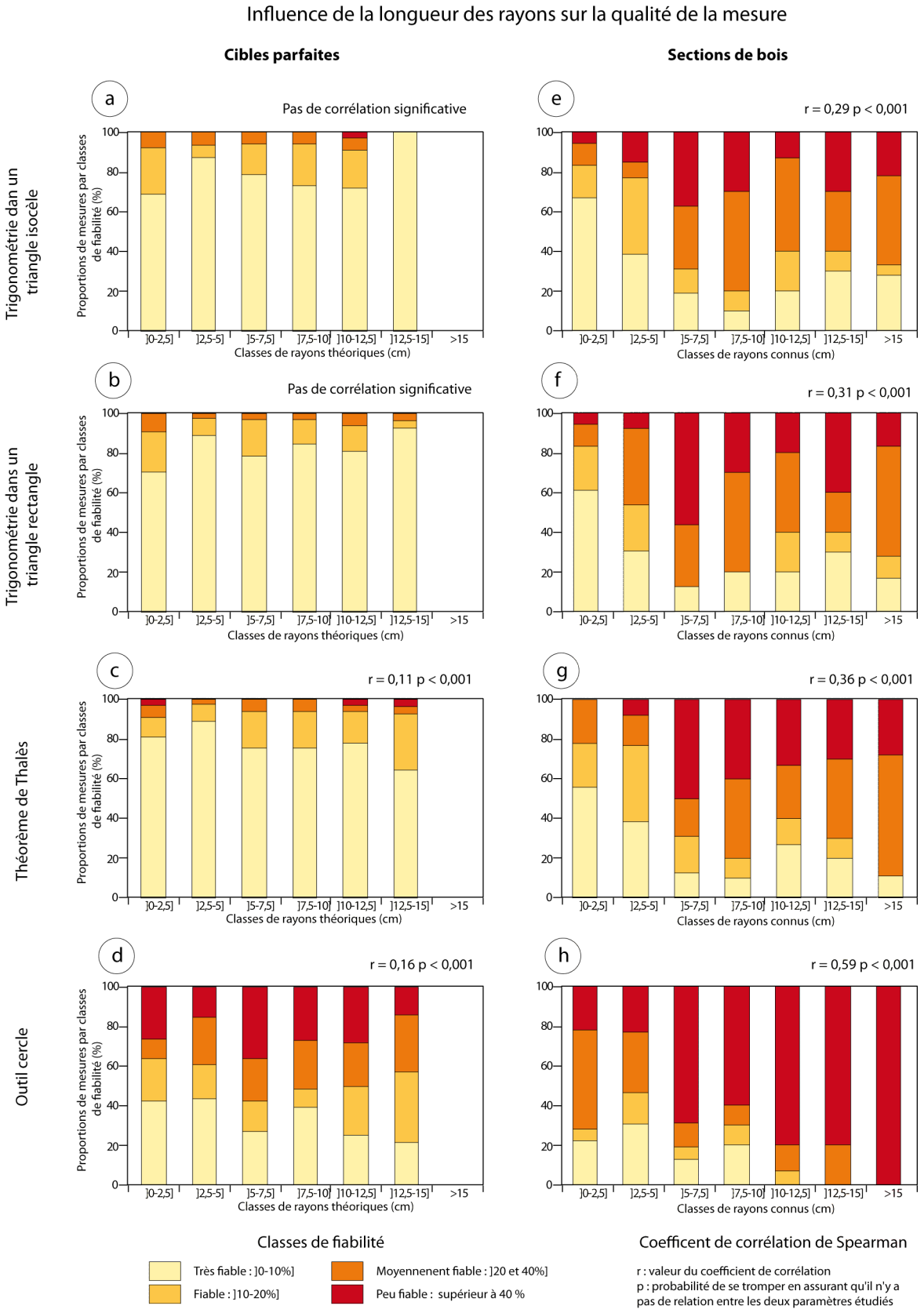


Figure 60 : Mise en évidence de l'influence de la longueur du rayon de courbure sur la précision de la mesure.

1.7.1. Les méthodes s'appuyant sur les rayons permettent de mesurer des rayons de courbures jusqu'à 12,5 cm

A la lecture des graphiques construits sur les cibles parfaites (figure 60 a, b, c), les proportions obtenues par classes de fiabilité sont quasiment identiques d'une classe de rayons à l'autre, avec plus de 70 % de mesures « très fiables ». En revanche, à la lecture des résultats obtenus sur les sections de bois (figure 60 d, e, f), il apparaît très clairement que les proportions de mesures « très fiables » et fiables » diminuent plus la longueur du rayon augmente. C'est à partir de 12,5 cm que l'on retrouve des proportions de mesures « peu fiables » et « moyennement fiables » plus importantes, avec près de 60 % de mesures. On peut donc dire que le rayon de courbure maximal mesurable se situe à cette limite. Néanmoins, on observe également d'importantes proportions de mesures « peu fiables » et « moyennement fiables » sur les rayons compris entre 5 et 10 cm. Malgré ces proportions de mesures « moyennement et peu fiables » plus importantes entre 5 et 10 cm pour les méthodes de mesures s'appuyant sur les rayons, à la lecture des données brutes (figure 55) nous pouvons tout de même faire la distinction entre les rayons de courbure mesurant 8 et 15 cm. Il est aujourd'hui difficile d'expliquer cette augmentation de mesures « peu fiables ». Est-ce lié à une variabilité naturelle du bois, qui nécessite une légère réorientation des rayons entre 5 et 10 cm de distance au cœur, faussant ainsi la mesure ? Est-ce seulement propres aux rondelles étudiées ? Pour répondre à ces questions il sera nécessaire de poursuivre cette analyse sur d'autres rondelles de bois, sur d'autres essences et surtout d'augmenter le nombre de mesures sur ces longueurs de rayons.

Si l'on prend donc en considération l'ensemble des mesures présentant des pourcentages d'erreurs inférieurs à 40 %, les trois méthodes de mesure utilisant les rayons permettent d'envisager des mesures de rayon de courbure jusqu'à 12,5 cm ; au-delà, les proportions de mesures « peu fiables » sont supérieures à 30 % (figure 55).

1.7.2. « L'outil cercle » ne permet pas de mesurer des rayons de courbure supérieurs à 5 cm

Si les résultats obtenus sur les cibles parfaites présentent moins de 40 % de mesures « peu fiables » sur l'ensemble des classes de rayons, les résultats obtenus sur les sections de bois sont nettement moins satisfaisants. Ces derniers présentent de fortes proportions de mesures « peu fiables » sur les longueurs de rayon supérieurs à 5 cm. Nous l'avions vu lors de la présentation des résultats bruts (figure 55), les mesures ne semblaient pas dépasser 6 cm quelle que soit la longueur du rayon de courbure mesuré. La représentation des proportions de mesures par classes de fiabilité vient donc renforcer cette observation. Sur les rayons supérieurs à 5 cm on observe des proportions de mesures « peu fiables » très importantes, comprises entre 60 et 100 %. Ces mesures ne peuvent pas être employées pour une étude précise du diamètre des bois, car il est alors impossible de restituer les grandes distances par rapport au cœur de la bûche.
Compte tenu de ces résultats, « l'outil cercle » doit être proscrit des méthodes employées pour mesurer le rayon de courbure.

1.8. La technique utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle, la plus simple et la plus efficace

Les démonstrations précédentes ont permis ainsi de définir la fiabilité, la précision et les limites de chacune des méthodes de mesure en fonction des trois paramètres pouvant influencer la précision de la mesure.
A l'issue de cette analyse « l'outil cercle » présente des résultats satisfaisants pour les rayons de courbure inférieurs à 5 cm, sur des échantillons présentant des angles très ouverts (supérieur à 6°) et des distances entre les rayons supérieures à 2 cm. Nous sommes alors dans des conditions tellement spécifiques que cela n'est pas applicable sur des dépôts anthracologiques. En dépit de sa simplicité de mise en œuvre, cet outil est à déconseiller pour conduire une analyse précise du diamètre des bois.

En ce qui concerne, les trois techniques s'appuyant sur les rayons, les résultats obtenus sont très proches. Ces dernières sont fiables sur des rayons de courbure inférieurs à 12,5 cm, sur une large gamme d'angles, en étant toutefois très attentif aux angles inférieurs à 2°, et

en excluant les distances entre les rayons inférieures à 2 mm. Compte tenu des résultats très similaires, le choix de la méthode de mesure à employer s'est donc porté sur la facilité et la simplicité à réaliser la mesure.

La méthode de trigonométrie dans un triangle isocèle a ainsi été choisie car elle est beaucoup plus facile à mettre en œuvre ; elle ne nécessite que deux mesures : l'angle et la distance entre les rayons. Quel que soit le logiciel d'analyse d'images, cela est facilement réalisable, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres techniques.

En effet, la méthode basée sur la trigonométrie dans un triangle rectangle, nécessite d'une part de mesurer l'angle entre les rayons mais d'autre part de tracer un angle droit en limite de cerne. Comme nous l'avons précédemment évoqué le logiciel d'analyse d'images sur lequel nous travaillons ne permet pas de créer automatiquement un angle droit. Reproduire le tracé jusqu'à obtenir un angle précis de 90° s'est avéré fastidieux et très chronophage. De plus, comme l'angle droit est construit en limite de cerne, il arrive parfois que l'intersection entre cette tangente et le rayon opposé ne puisse pas être établie dans la zone de travail de l'image. Dans ce cas, la mesure ne peut évidemment pas être réalisée.

En ce qui concerne la méthode de mesure utilisant le théorème de Thalès, la mesure est finalement assez simple à réaliser, mais cela nécessite d'une part de construire deux séries de droites parallèles, et d'autre part de prendre les mesures de trois segments. Le temps d'analyse est donc largement doublé comparé à la méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle.
La rapidité d'exécution et la bonne fiabilité de la méthode s'appuyant sur la trigonométrie dans un triangle isocèle, justifient notre choix d'employer cette technique par la suite.

Cependant, la mesure du rayon de courbure réalisée à partir du logiciel d'analyse d'images (qui ne permet de mesurer que des angles et des distances) nécessite beaucoup plus de temps que les simples observations faites directement sous la loupe binoculaire. Pour chaque échantillon il faut d'abord réaliser les mesures à partir des outils du logiciel d'analyse d'images, puis saisir chaque mesure dans un tableur Excel, afin de calculer le rayon de courbure correspondant. Pour simplifier la mesure du rayon de courbure, une application à partir du logiciel libre « ImageJ » a été mise en place.

2. « AnthracoLoJ », un outil pour simplifier et automatiser la mesure du rayon de courbure

La technique de mesure choisie, il s'agit de la rendre la plus simple possible, d'automatiser l'acquisition et l'enregistrement des mesures du rayon de courbure pour permettre d'effectuer cette analyse en routine sur un corpus anthracologique.
A cette fin, une application a été mise en place : « AnthracoLoJ », avec la collaboration de J.Ph. Leleu (chercheur associé au laboratoire Géolab UMR 6042 CNRS).

Dans le cadre de cette étude, nous avons d'abord testé cet outil pour évaluer sa fiabilité et ses limites, puis nous avons également cherché à établir la marge d'erreur qui lui était associée, obtenant ainsi pour chaque mesure un intervalle de confiance. Les mesures tests ont été effectuées sur des rondelles de bois d'abord fraîches puis carbonisées.

2.1. Principe et fonctionnement de l'application

Cette application est relativement simple à employer. Il s'agit en réalité d'un « plugin » (application informatique) associé au logiciel libre « ImageJ ». L'interface « AnthracoLoJ » permet d'enregistrer une image, d'en calculer l'échelle, d'enregistrer l'ensemble des observations faites sur les charbons puis permet de mesurer le rayon de courbure pour chaque échantillon étudié (figure 61).

2.2.1. Enregistrement de l'image

Afin d'enregistrer une image de bonne qualité, nous travaillons à partir de deux écrans ; sur l'un s'affiche l'interface « AnthracoLoJ » et sur l'autre l'image de l'échantillon, obtenue en direct à partir d'une caméra fixée sur la loupe binoculaire. Il est ainsi facile, sous la loupe binoculaire, de bien choisir la zone à étudier et de réaliser convenablement la bonne mise au point. Lorsque l'image obtenue sur l'analyseur d'images est correcte, on procède alors à une capture d'écran directement à partir de l'application « AnthracoLoJ ». En présence de deux écrans, l'application est programmée pour capturer uniquement l'image de l'échantillon.

Chaque image acquise à partir de l'application est automatiquement enregistrée sous le nom souhaité par l'opérateur. Ainsi il est assez facile de revenir à tout moment sur un échantillon pour vérifier la mesure du rayon de courbure (figure 61 B).

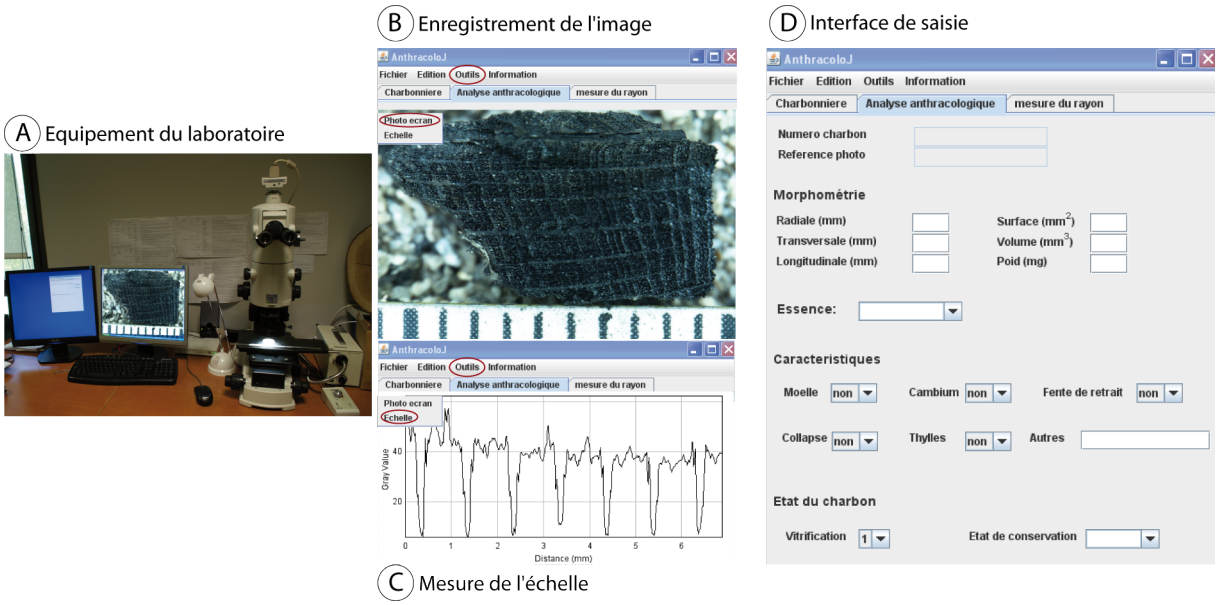


Figure 61 : Présentation de l'équipement (A) et des différentes fenêtres de l'application « AnthracoLoJ » (B, C, D).

2.2.2. Mesure de l'échelle

Avant de procéder à la mesure du rayon de courbure, il est important de renseigner l'échelle de l'image. En effet, à chaque variation de grossissement sous la loupe binoculaire, à chaque mise au point, l'échelle est légèrement modifiée. Pour s'assurer d'obtenir les mesures précises de chaque échantillon, une échelle graduée millimétrique est placée dans la partie inférieure de l'image. L'outil « échelle » mis en place dans l'application permet automatiquement d'établir la taille de l'image. En effet, un cadre de sélection s'applique automatiquement sur la partie inférieure de l'image, emplacement où l'échelle graduée est positionnée. Sur cette zone, un plugin mesure les variations d'intensité lumineuse. Ainsi les graduations noires sont identifiées comme des zones de faibles intensités lumineuses, alors que les espaces entre les graduations, généralement blanches, présentent de fortes intensités lumineuses (figure 61, C). C'est donc en calculant la distance entre les deux pics de faible intensité lumineuse que l'échelle est établie. C'est uniquement après cette étape de calcul de l'échelle que l'ensemble des mesures peut être réalisé.

2.2.3. Mesure du rayon de courbure

La mesure du rayon de courbure sous « AnthracoLoJ » nécessite de positionner uniquement quatre points stratégiques sur l'image, permettant ainsi de mesurer l'angle et la distance entre les rayons.
Pour cela, il faut dans un premier temps choisir le cerne pour lequel on désire travailler (sur des corpus anthracologiques on choisit généralement le cerne le plus externe), ainsi que les deux rayons sur lesquels la mesure va être effectuée. Il est important de choisir des rayons les plus distants possibles (toujours distants au minimum de 2 mm).

Le premier point doit se situer à l'intersection entre l'un des rayons étudiés et la limite de cerne choisie. Le deuxième point doit quant à lui uniquement être placé sur le même rayon le plus loin possible. La mesure se poursuit ensuite sur le second rayon étudié. Le troisième point doit être positionné sur le rayon ; peu importe s'il se trouve sur une limite de cerne, ce dernier doit être placé le plus possible vers le cœur du bois. En revanche, le quatrième et dernier point doit être placé précisément à l'intersection entre le rayon et la limite de cerne étudié (comme pour le premier point). Il est primordial que le premier et le dernier point soient placés sur la même limite de cerne, sinon la mesure serait complètement faussée (figure 62).

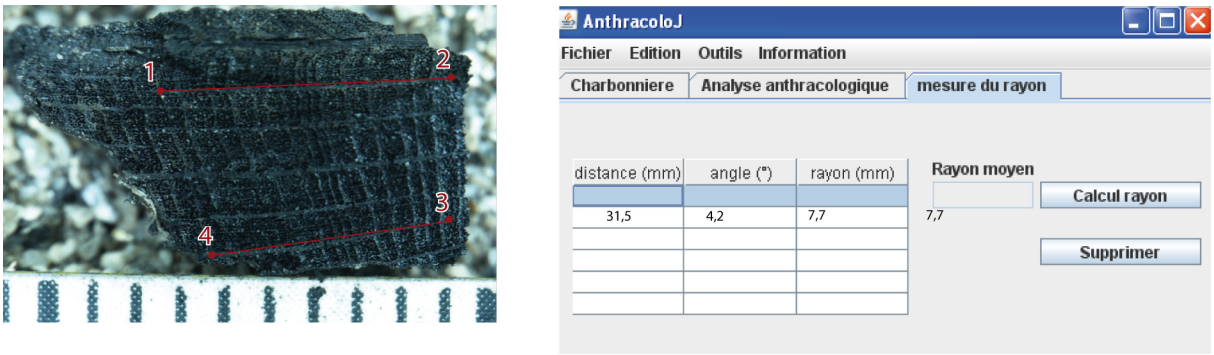


Figure 62 : Explication de la position des points pour réaliser la mesure.

Lorsque les quatre points sont placés, l'application mesure l'angle et la distance entre les rayons et calcule automatiquement à partir de la formule trigonométrique le rayon de courbure. Afin de vérifier l'homogénéité des rayons de courbure mesurés, il est important de reproduire la mesure au minimum trois fois sur le même cerne et l'application calcule ensuite le rayon de courbure moyen. Si pour un échantillon, une mesure est très éloignée du

reste des mesures, alors celle-ci peut être supprimée. En revanche, si malgré la reproduction des mesures, les données restent très dispersées, alors aucune mesure du rayon de courbure n'est enregistrée, seul un commentaire est ajouté pour indiquer la raison de l'absence de mesure.

Après chaque mesure de rayon de courbure, les données sont automatiquement enregistrées au format « .txt » dans un dossier créé précédemment par l'opérateur. Ce format de fichier est facilement exploitable à partir de nombreux logiciels.

2.2. Evaluer la précision de l'outil « AnthracoLoJ » sur des rondelles de bois et sur des fragments de charbons de bois

Dans la première partie de ce chapitre, la précision de la méthode de mesure basée sur la trigonométrie dans un triangle isocèle a bien été évaluée. Il s'agit ici de définir cette fois-ci la fiabilité de l'outil « AnthracoLoJ ». En effet, il est important d'évaluer si le procédé de capture d'écran et le calcul de l'échelle n'engendrent pas de biais pour la mesure du rayon de courbure, mais également de vérifier la fiabilité et la précision de l'outil.

2.2.1. Protocole de mesure

Pour tester la fiabilité, évaluer les limites de cet outil nous avons procédé de la même façon que pour évaluer la précision des méthodes de mesure. En revanche, les mesures ont uniquement été réalisées sur des rondelles de bois polies puis sur ces mêmes rondelles mais carbonisées.

a) Mesures sur les rondelles de bois

Pour cette étude 229 mesures ont été réalisées : 105 mesures sur deux rondelles de hêtre, 74 sur une rondelle de chêne et 50 sur trois rondelles de châtaignier. Chaque section était parfaitement polie, permettant ainsi une meilleure lecture des limites de cernes et des rayons. Chaque rondelle de bois a été placée sous la loupe binoculaire, puis différentes mesures ont été réalisées en délimitant les zones à analyser à l'aide de fenêtres d'étude mesurant 4 mm, 1 cm et 2,5 cm. Afin d'avoir un échantillonnage homogène, un minimum

de cinq mesures a été réalisé tous les centimètres avec pour plus petit rayon 2 mm et pour plus grand 215 mm. Toutefois, un plus grand nombre de mesures a été effectué sur des petits diamètres pour permettre de tester la mesure sur une large gamme d'angles. En ce qui concerne la distance entre les rayons, celle-ci a une fois encore été conditionnée par le champ de vision de la caméra toujours limité à 25 mm. Les mesures ici réalisées sont comprises entre 2 et 23 mm. Aucune mesure n'a été réalisée sur des rayons de courbure inférieurs à 2 mm car dans la précédente étape il a été démontré que ces conditions conduisaient à une augmentation des pourcentages d'erreur.

En ce qui concerne les angles entre les rayons, ces derniers présentent une large gamme, avec des valeurs comprises entre 1° et 127°. De plus, le nombre de mesures est relativement bien réparti sur l'ensemble des classes d'angles. Les angles inférieurs à 1° ont été écartés de l'analyse du fait des proportions importantes de mesures « peu fiables » obtenues lors de la comparaison des quatre méthodes de mesure (cf, 1.5.6).

b) Mesure sur les charbons de bois

Notre objet d'étude étant le charbon de bois, il était important d'établir la fiabilité de l'outil « AnthracoLoJ » sur un corpus de charbons de bois. Afin d'étudier les mêmes déformations naturelles que celles observées sur les rondelles de bois, nous avons décidé de travailler sur les même sections de bois. Pour cela, une fois les mesures réalisées sur les sections de bois, les rondelles de hêtre et celle de chêne ont été carbonisées dans un four de potier chauffé au bois, aux Tuileries de Pouligny en Creuse.

Pour évaluer la fiabilité de l'outil il était indispensable de pouvoir mesurer la position du charbon par rapport au cœur du bois ; il est donc primordial que chaque rondelle de bois, même une fois carbonisée, reste parfaitement en place et se fragmente le moins possible. Pour chaque section de bois, une boite en terre cuite a été confectionnée sur mesure, permettant ainsi de cuire le bois sans contact direct avec les flammes. Les boites contenant les rondelles ont été chauffées pendant 45 min à 500°C environ (figure 63).
A l'issue de la carbonisation, les sections de bois étaient parfaitement transformées en charbon de bois. Des fragments de charbon de bois ont été ensuite prélevés sur chacune des sections carbonisées.

Figure 63 : Carbonisation des rondelles de bois dans un four de potier aux tuileries de Pouligny. (A) Section de bois. (B) four de potier chauffé au bois. (C) Foyer dans lequel sont placées les sections de bois. (D) Boite contenant les sections de bois. (E) Section de bois carbonisée

Avant de retirer le charbon de la rondelle carbonisée, nous avons mesuré, à l'aide d'une règle, la distance au cœur. Pour être le plus objectif possible lors de la mesure, sans être influencée par la mesure réalisée à la règle, chaque charbon a été placé dans un sac portant un numéro. Un échantillonnage des 132 charbons a été réalisé, en ayant choisi des charbons pour obtenir plusieurs individus pour chaque centimètre. Les rayons de courbure connus sont compris entre 7 mm et 149 mm. Les fragments étudiés présentent des distances entre les rayons comprises entre 2 mm et 9 mm, et des angles compris entre 1° et 45°.

Nous avons alors commencé l'analyse sans connaître la taille réelle du rayon de courbure. Lors de la mesure, nous avons procédé de la même manière que pour les charbons archéologiques ; chaque charbon a été cassé, selon la section transversale, afin de bien observer les rayons ligneux et les limites de cernes.

2.2.2. Présentation des résultats bruts

Les graphiques de la figure 64 permettent de comparer rapidement les rayons mesurés aux rayons connus. Les résultats obtenus sur les sections de bois et sur les charbons de bois sont très similaires. En effet, malgré les processus de carbonisation, les mesures sur les charbons de bois ne semblent pas présenter un écart plus important entre le rayon connu

et le rayon mesuré que sur les rondelles de bois. La dispersion autour des valeurs moyennes n'a également pas augmenté. On observe toujours des erreurs associées très faibles sur les petits rayons de courbure et plus larges sur les grands rayons de courbure.

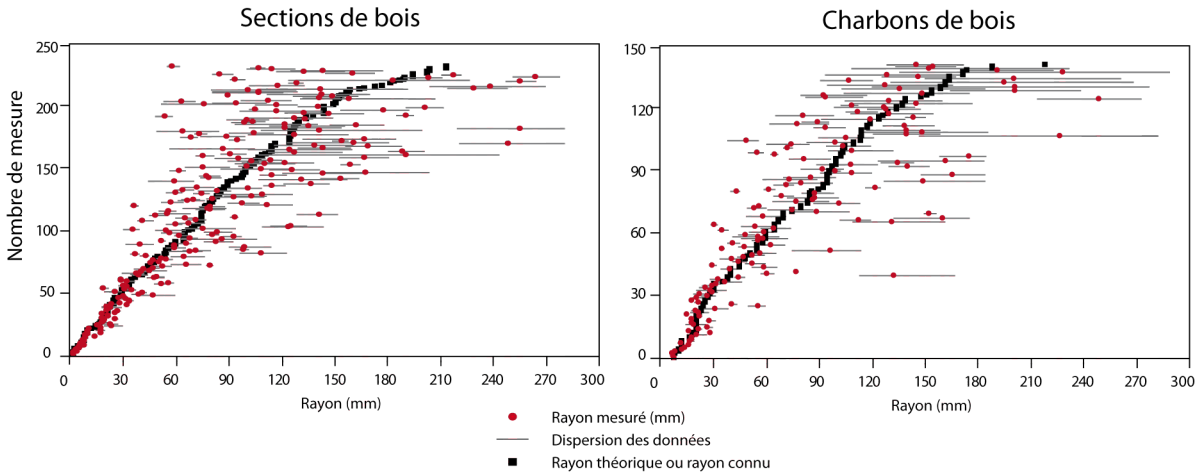


Figure 64 : Comparaison des mesures réalisées sur les sections de bois polies et les charbons de bois avec les longueurs de rayons connus.

Les mesures présentées ici ont été réalisées sur trois essences de bois. Nous avons en effet cherché à contrôler si les résultats obtenus étaient différents d'une essence à l'autre.

La comparaison des écarts entre les rayons connus et les rayons mesurés a été réalisée à partir du test de Kruskal-Wallis. Ce test permet d'évaluer si les différences entre deux échantillons sont significatives mettant ainsi en évidence la présence de différentes populations nécessitant un traitement indépendant pour chacune d'elle. Les résultats de notre étude ne présentent pas de différences significatives ($p = 0{,}054$ pour les sections de bois, et $p = 0{,}535$ pour les charbons de bois). Les différences anatomiques entre le chêne, le hêtre et le châtaignier ne semblent pas influencer la précision de la mesure. Considéré comme provenant d'une même population, l'ensemble des mesures a alors pu être traité.

2.2.3. Etudier la répartition des pourcentages d'erreur en fonction des trois paramètres

Etudier la répartition des pourcentages d'erreur pour chacun des paramètres pouvant influencer la qualité de la mesure permet de définir les limites techniques de l'outil « AnthracoLoJ ». Pour réaliser cette analyse, nous avons employé le même protocole que pour tester la fiabilité des quatre méthodes de mesure. La proportion de mesures, par classe de fiabilité a dans un premier temps été calculée puis répartie selon les mêmes classes d'angles, de distances entre les rayons et de longueurs de rayons.

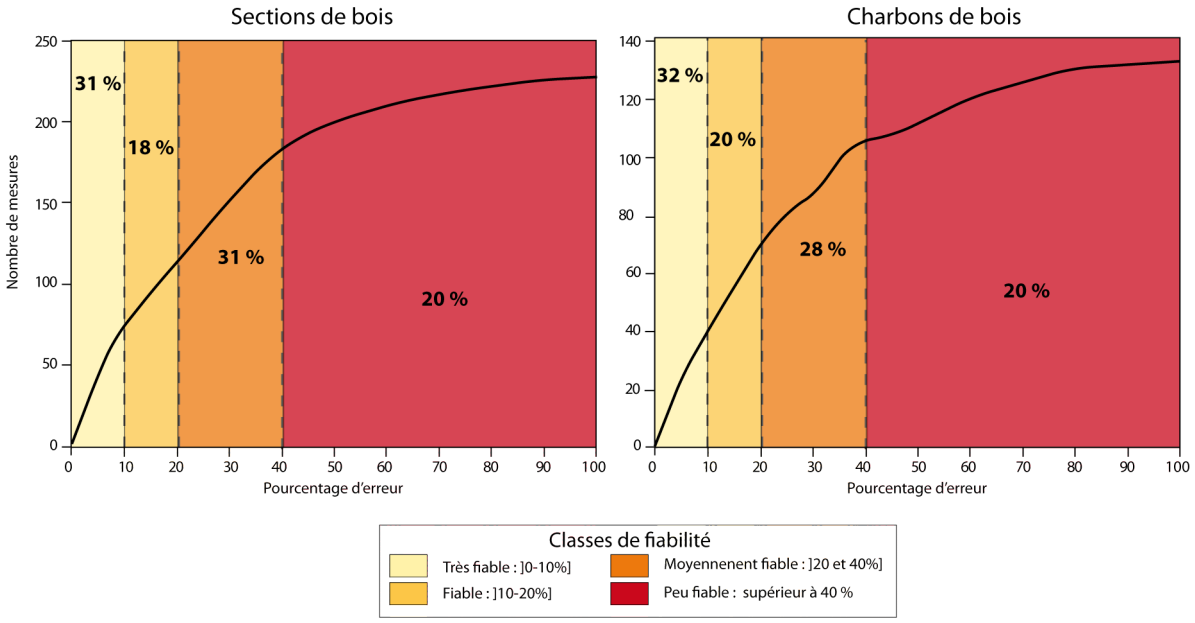


Figure 65 : Evolution des pourcentages d'erreur en fonction du nombre de mesures réalisées à partir de la technique de mesure utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle.

Si l'on observe l'évolution des pourcentages d'erreur (figure 65), que ce soit sur les sections de bois ou sur les fragments de charbons de bois, on se rend compte que les résultats sont très proches, avec respectivement 31 et 32 % de mesures « très fiables », 18 et 20 % de mesures « fiables » et 31 et 28 % de mesures « moyennement fiables ».

Pour définir la fiabilité et les limites de l'outil « AnthracoLoJ », il convient maintenant d'étudier de près la répartition des pourcentages d'erreur sur les angles, les distances entre les rayons et les longueurs de rayon.

a) Influence de l'angle sur la qualité de la mesure

A l'issue des calculs des coefficients de corrélation entre le pourcentage d'erreur et les angles entre les rayons, on identifie une relation très faible mais significative sur les sections de bois ($r = 0,26$ avec $p < 0,05$), alors qu'il n'y a pas de relation sur les charbons. Cela s'explique par le faible nombre d'angles très ouverts ou très fermés pour les mesures réalisées sur les fragments de charbon de bois. En effet, l'essentiel des mesures réalisées est compris entre 2 et 8°.

Sur la figure 66 (a), on observe une répartition assez homogène des données « très fiables et fiables » sur l'ensemble des classes, et les résultats sont très similaires sur les sections de bois et sur les fragments de charbon. Les proportions de mesures « très fiables » sont d'ailleurs plus importantes sur les fragments de charbon que sur les sections de bois avec des proportions comprises entre 26 et 50 %.

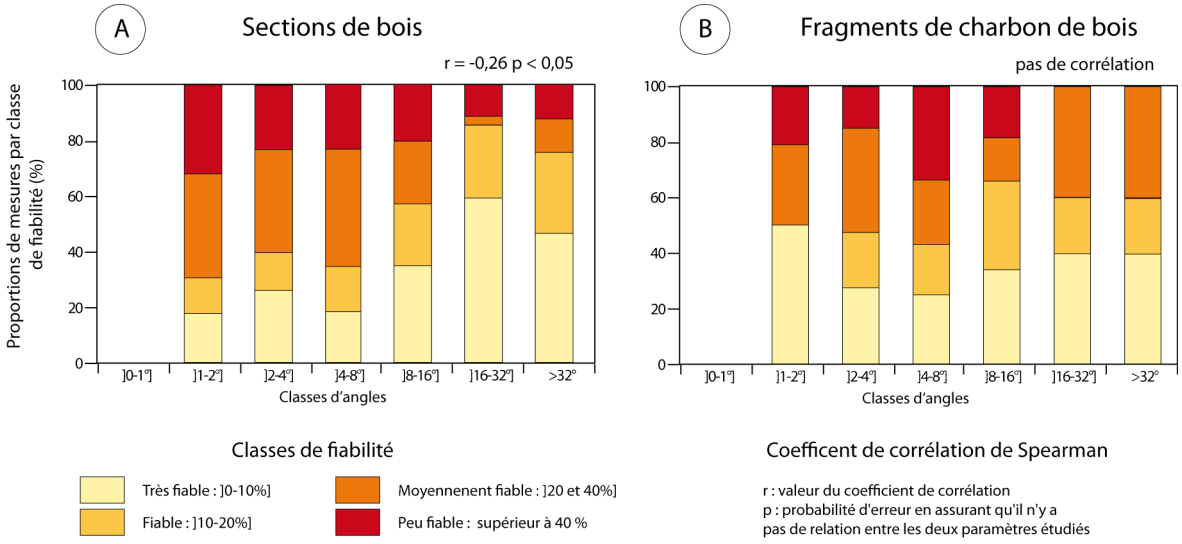


Figure 66 : Evaluer l'influence de l'angle sur la précision de la mesure sur les sections de bois (A) et sur les fragments de charbon (B)

Malgré ces bons résultats, on retrouve néanmoins des proportions de données « peu fiables » en plus grande quantité sur les angles inférieurs à 2°, avec 31 % pour les sections de bois par exemple. Cela met donc en évidence une fois encore la nécessité d'être plus vigilant sur les angles faiblement ouverts lors de la mesure des rayons de courbure. Il ne s'agit pas d'exclure les angles inférieurs à 2°, mais plutôt de reproduire la mesure un plus grand nombre de fois afin de s'assurer de la fiabilité de la mesure.

b) Influence de la distance entre les rayons sur la qualité de la mesure

En ce qui concerne l'influence de la distance entre les rayons sur le pourcentage d'erreur, les résultats obtenus pour les rondelles de bois et pour les fragments de charbon présentent tous une corrélation nulle (les coefficients de corrélation ne sont pas significatifs).
Malgré la faible gamme de distances entre les rayons obtenue sur les charbons de bois, les résultats obtenus pour les sections de bois et pour les fragments de charbons sont parfaitement comparables. En effet, sur les trois classes en commun, on observe près de 50 % de données « très fiables et fiables ». Seuls, les résultats obtenus sur les sections de bois montrent des proportions de mesures « peu fiables » plus élevées dans la classe] 2-4 mm], avec 34 % des mesures (figure 67).

Ces résultats mettent en évidence que les distances entre les rayons supérieurs à 2 mm ne semblent pas influencer la précision de la mesure du rayon de courbure à partir de l'application « AnthracoLoJ ».

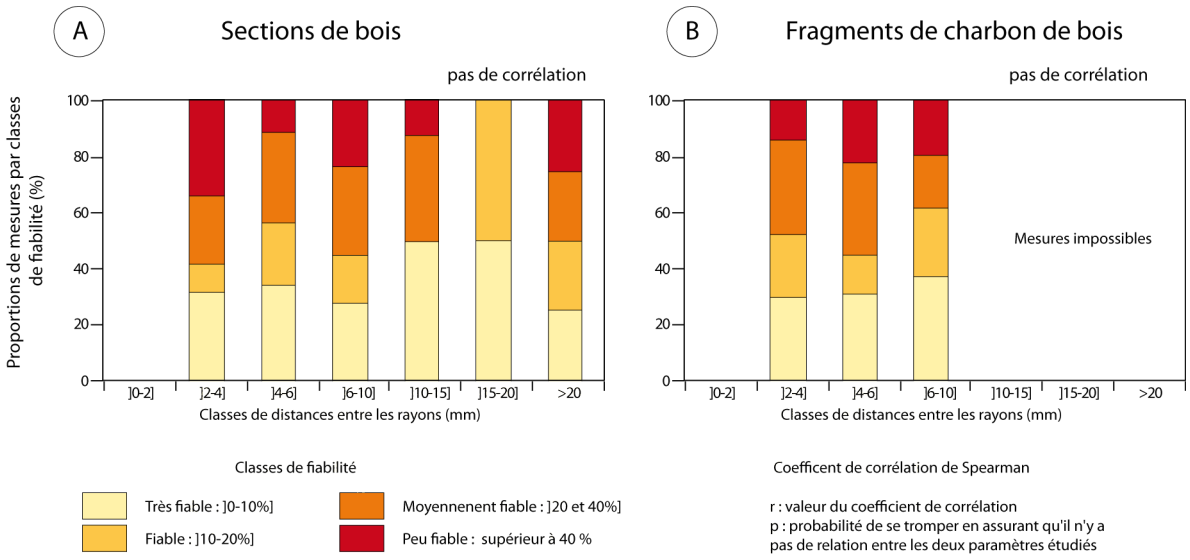


Figure 67 : Evaluer l'influence de la distance entre les rayons sur la précision de la mesure sur les sections de bois (a) et sur les fragments de charbon (b)

c) Influence de la longueur du rayon sur la qualité de la mesure

Enfin, en ce qui concerne la longueur du rayon de courbure, les résultats obtenus à partir des coefficients de corrélation montrent, comme pour l'angle entre les rayons, une corrélation très faible mais significative entre le pourcentage d'erreur et la longueur du rayon sur les rondelles de bois ($r = 0,24$ avec $p < 0,05$), alors que la relation est nulle sur les fragments de charbons de bois.

Les graphiques représentant la répartition des pourcentages d'erreur en fonction des classes de rayons montrent des proportions de mesures «peu fiables » assez homogènes sur l'ensemble des classes de rayons (figure 68). Les différences sont plus visibles sur les proportions de mesure « très fiables et fiables ». En effet, qu'il s'agissent des sections de bois ou des fragments de charbon, on observe une diminution de la proportion de mesures « très fiables et fiables » sur les classes] 7,5-10 cm] et] 10-12,5cm]. Sur les sections de bois on passe en effet de 50 % de mesures « très fiables et fiables » pour les rayons de courbure inférieurs à 7,5 cm, à 40 % dans la classe] 7,5-10 cm] puis à seulement 32 % dans la classe] 10-12,5cm] (figure 68, a). Sur les fragments de charbon de bois la baisse n'est pas aussi importante, on a toujours un peu plus de 45 % de mesures « très fiables et fiables » pour les rayons compris entre 7 et 12,5 cm. Dans ce cas, seules les proportions de mesures « peu fiables » observées dans la classe] 12,5-15 cm] sont très importantes, avec plus de 40 % des mesures (figure 68, b).

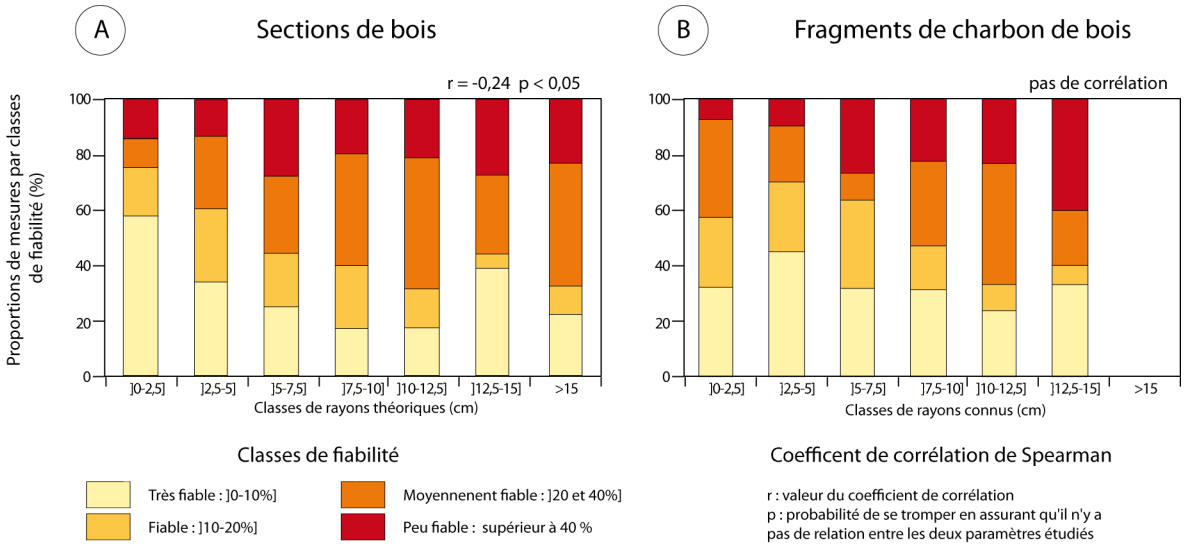


Figure 68 : Evaluer l'influence de la longueur du rayon sur la qualité de la mesure

Ces résultats mettent ainsi en évidence la difficulté de mesurer des rayons de courbure supérieurs à 12,5 cm. Cela ne signifie pas en revanche qu'il faille écarter toutes les mesures supérieures à cette taille. Il faut toutefois être plus vigilant lors de la prise de mesure mais également lors des interprétations en terme de diamètre de bois.

Grâce à cette étude, nous avons pu observer que les résultats obtenus à partir de mesures réalisées avec l'application « AnthracoLoJ » étaient aussi fiables que ceux obtenus à partir des mesures faites avec l'analyseur d'images « Lucia » de Nikon. L'outil mis en place n'engendre donc pas de biais supplémentaires à la mesure du rayon de courbure.
Cet outil permet donc de bien différencier des petits rayons de courbure des plus grands, sur une large gamme d'angles, de distances entre les rayons et de longueurs de rayon de courbure. Même si la précision sur des rayons de courbure de grande taille est moins bonne, ces mesures indiquent tout de même la présence de grands rayons de courbure, ce qui est particulièrement intéressant lors des interprétations paléoécologiques.

2.3. Définir l'erreur associée à la mesure pour « l'outil AnthracoLoJ »

Les analyses précédentes nous ont permis de définir les limites de l'outil sur les rondelles de bois et sur les fragments de charbons. Eviter de mesurer des échantillons présentant des distances entre les rayons inférieures à 2 mm et des angles inférieurs à 1° est désormais acquis. En revanche, pour être le plus précis possible lors de nos interprétations, il est important d'évaluer la marge d'erreur moyenne que l'on pourra appliquer à l'ensemble des mesures réalisées.

Lorsque l'on représente le pourcentage d'erreur obtenu en fonction de la longueur du rayon connu, on n'observe aucune relation (figure 69). Cela avait déjà été démontré par le calcul des coefficients de corrélation. La large dispersion des données, de façon complètement aléatoire nous permet de calculer une erreur moyenne valable pour l'ensemble des rayons de courbure.

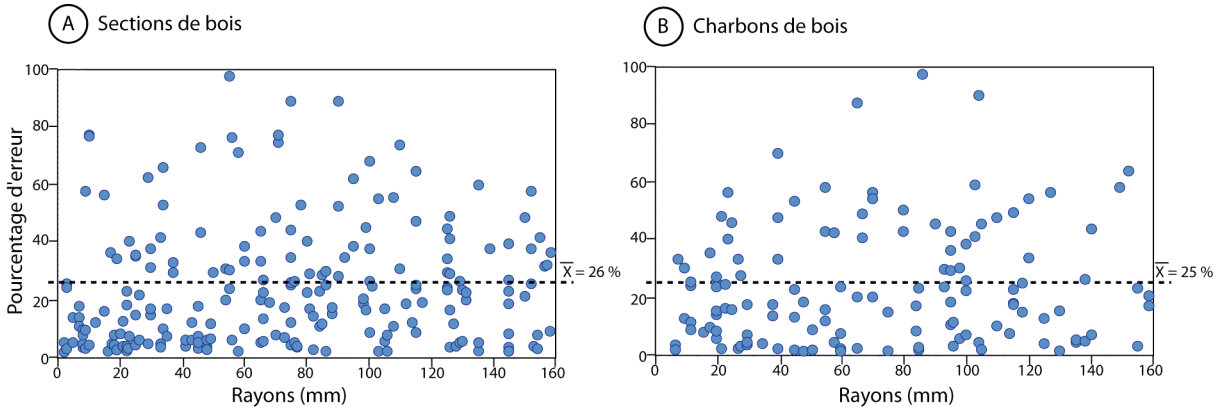


Figure 69 : Comparaison des pourcentages d'erreur obtenus sur les sections de bois et sur les charbons permettant d'établir une valeur moyenne de l'erreur associée à la mesure

Les valeurs obtenues sur les rondelles de bois et sur les fragments de charbons de bois sont très proches avec respectivement un pourcentage d'erreur moyen de 26 et 25 %. Cette faible différence entre l'erreur associée obtenue sur les rondelles de bois et celle obtenue sur les fragments de charbon témoigne de l'absence d'incidence de la carbonisation sur la mesure du rayon de courbure. Le test de Kruskal Wallis met d'ailleurs en évidence cette absence de différence entre les marges d'erreur obtenues sur les rondelles de bois et celles obtenues sur les fragments de charbon de bois ($p = 0,822$ la différence entre les échantillons n'est donc pas significative).

L'absence d'incidence de la carbonisation sur la précision de la mesure est rassurante pour les analyses dendro-anthracologiques. Cela signifie que malgré la réduction de volume et de masse, les structures anatomiques du bois ne sont pas déformées. Il y a une réduction de l'ensemble des cellules mais celle-ci reste proportionnelle dans les trois plans de l'espace, ce qui ne déforme pas les structures anatomiques sur lesquelles nous nous appuyons pour réaliser nos mesures.
La longueur du rayon de courbure aura bien évidemment changé, en raison du retrait transversal évalué par plusieurs auteurs de 15 à 20 % (Schweingruber, 1978 ; Thinon, 1992). Il sera important pour la suite de l'étude du diamètre des bois de prendre en compte ce paramètre.

Cette approche doit à l'avenir être encore approfondie, et cela sur des corpus de bois bien plus diversifiés. En effet, les travaux menés par Dufraisse et Garcia (2011) ont mis en évidence des différences de fiabilité entre le hêtre et le pin sur la méthode de trigonométrie. Il semblerait que le hêtre présente un plus grand nombre de mesures ayant des pourcentages

d'erreur supérieurs à 45 %. Il est donc important à l'avenir de tester l'outil « AnthracoLoJ » sur des sections de bois et de charbons ayant une structure anatomique très différente afin d'identifier notamment si l'anatomie des feuillus et des conifères influence plus ou moins la qualité des mesures.

Afin de tester cet outil sur un contexte le plus proche possible des résidus charbonneux prélevés sur les plateformes de charbonnage archéologiques, nous avons réalisé les mesures du rayon de courbure sur un large corpus anthracologique provenant des expérimentations de trois charbonnières précédemment présentées.

3. Tester la représentativité des spectres dendrométriques sur des charbonnières expérimentales

A travers les précédentes démonstrations nous avons mis en évidence la qualité des mesures du rayon de courbure avec l'outil « AnthracoLoJ », mais mesurer des charbons dont on connaît la distance par rapport au cœur est très éloigné des contextes archéologiques. La carbonisation en meule d'un assemblage de bûches produit d'importantes quantités de charbon de bois mais l'essentiel des charbons produits ont disparu de la plateforme, ces derniers étant utilisés pour différents usages. On peut alors se demander si la fraction résiduelle de charbons permet de retrouver le diamètre des bois charbonnés.

Nous l'avons vu dans le chapitre 3, retrouver le diamètre des bois nécessite deux étapes, la mesure du rayon de courbure, puis l'interprétation de ces données à travers des modèles mathématiques. La mesure du rayon de courbure dont nous venons d'évaluer la fiabilité est donc à la base de la recherche du diamètre des bois. Il convient donc maintenant de vérifier si les spectres dendro-anthracologiques obtenus à l'issue de l'analyse des charbons de bois sont bien représentatifs des bois mis dans les meules.

Dans le cadre de l'expérimentation que nous avons réalisée aux Tuileries de Pouligny (cf, chapitre 3), trois meules ont fait l'objet d'une étude très approfondie du diamètre des bois. L'ensemble des bûches mises dans les meules est parfaitement connu ; il s'agit de comparer les spectres dendro-anthracologiques aux proportions de diamètres connus avant la carbonisation.

3.1. Connaître le diamètre des bois mis dans les meules

Tester la représentativité des spectres dendro-anthracologiques nécessite de bien connaître la composition en diamètres des différentes charbonnières. Pour cela, chaque bûche a fait l'objet d'une estimation précise du diamètre. Mais cela est loin d'être suffisant pour comparer les résultats de l'analyse dendro-anthracologique aux diamètres initialement mis dans les meules. En effet, les charbons étudiés proviennent de toutes les parties de la bûche. Lors, de la carbonisation une bûche de 10 cm de diamètre va produire une quantité de charbon de bois ayant des rayons de courbure compris entre 0 et 5 cm. Prendre en

considération la fragmentation n'est pas chose simple. A. Dufraisse, propose de considérer les bûches comme un emboîtement de cylindres creux (Dufraisse, 2002). Ainsi le calcul des proportions de volume par classe de cylindres creux de l'ensemble des bûches mis dans les meules permet d'obtenir des spectres similaires à ceux construits à l'issue des analyses dendo-anthracologiques. Pour bien comprendre cette phase de « décomposition » virtuelle, il nous semble nécessaire de détailler chaque étape.

3.1.1. Calculer les proportions par classes de diamètres sur les bûches entières

Parmi, les trois meules construites, la première est uniquement composée de bois de petits diamètres (inférieurs à 10 cm) ; dans ce cas, seules des bûches rondes ont été utilisées. La seconde a été construite uniquement avec des bois de plus gros diamètres (supérieurs à 10 cm). Afin de respecter les limites techniques de nos charbonniers, l'ensemble de ces bûches a été refendu afin d'obtenir des gabarits à peu près identiques à ceux mis dans la charbonnière aux petits diamètres. La dernière charbonnière a été constituée d'un mélange de petits et plus gros bois donc de bûches rondes et de bois refendu.
Comme cela a été précédemment présenté pour connaître parfaitement la composition en diamètre de chaque meule chaque bûche a été mesurée en prenant en compte le diamètre inférieur, le diamètre supérieur et la longueur de la bûche (cf, chapitre 3).

La mesure des diamètres inférieurs et supérieurs de chaque bûche permet d'établir un diamètre moyen. En effet, pour calculer le volume de chaque bûche, nous avons considéré ces dernières comme des cylindres avec pour valeur le diamètre moyen calculé et la hauteur correspond à la longueur de la bûche.

a) Choisir des classes de diamètres adaptées au contexte de charbonnage

Pour présenter la composition en diamètre de chaque meule, il est plus simple de discrétiser l'ensemble des données au sein de classes de diamètres. Pour établir ces classes, il faut que les bornes choisies soient cohérentes avec notre objet d'étude à savoir les bois charbonnés, mais également qu'elles tiennent compte de la fiabilité de l'outil « AnthracoLoJ » permettant de mesurer les rayons de courbure sur les charbons de bois. Les marges d'erreur liées à l'outil de mesure nous permettaient d'envisager des classes relativement resserrées :

] 0-0,25 cm],] 0,25-0,5 cm],] 0,5-1 cm],] 1-2 cm],] 2-4 cm],] 4-8cm],] 8-16cm] et supérieures à 16 cm. Mais employer des classes si précises sur les petits diamètres n'a pas beaucoup de sens pour restituer l'image des bois charbonnés. Nous avons donc choisi cinq classes de diamètres adaptés au contexte de charbonnage. A travers les descriptions des charbonnières il est certes difficile de définir si les charbonniers privilégient ou non du petit bois, mais l'on peut tout de même dégager différentes gammes de diamètres employées. On peut considérer les bois compris entre 0 et 2 cm de diamètre comme des « très petits bois », ceux compris entre 2 et 5 cm comme des « petits bois », entre 5 et 10 cm on parle alors de « bois moyens ». Les dénominations sont un peu plus compliquées à employer par la suite ; en effet nous avons considéré les bois compris entre 10 et 18 cm de diamètre comme des «gros bois », et l'ensemble des bois supérieur à 18 cm de diamètre comme des « très gros bois » (figure 70). Bien évidemment la classe des « très gros bois » ne correspond pas totalement à la présence de bois de très gros diamètre, cela devra être pris en considération lors de la discussion des données.

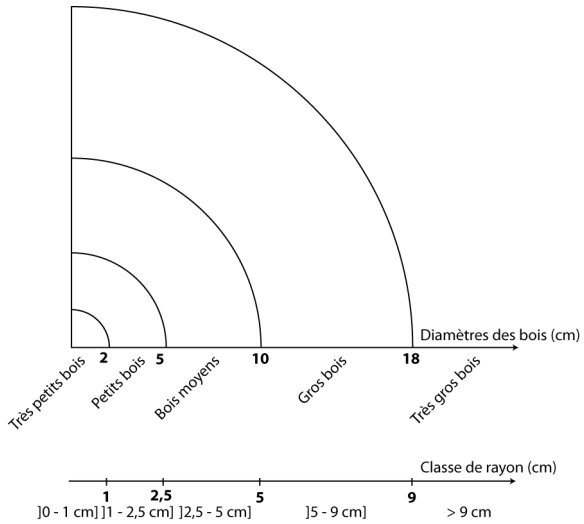


Figure 70 : Présentation des 5 classes de diamètres associées à des parties anatomiques d'un arbre, que l'on transpose par la suite en classe de rayon de courbure pour la construction des spectres dendro-anthracologiques

b) Calculer les proportions par classe de diamètres pour chaque essence au sein de chaque charbonnière

Pour chaque essence nous avons ainsi pu calculer les proportions par classes de diamètres en fonction du volume et de la surface de chaque bûche.

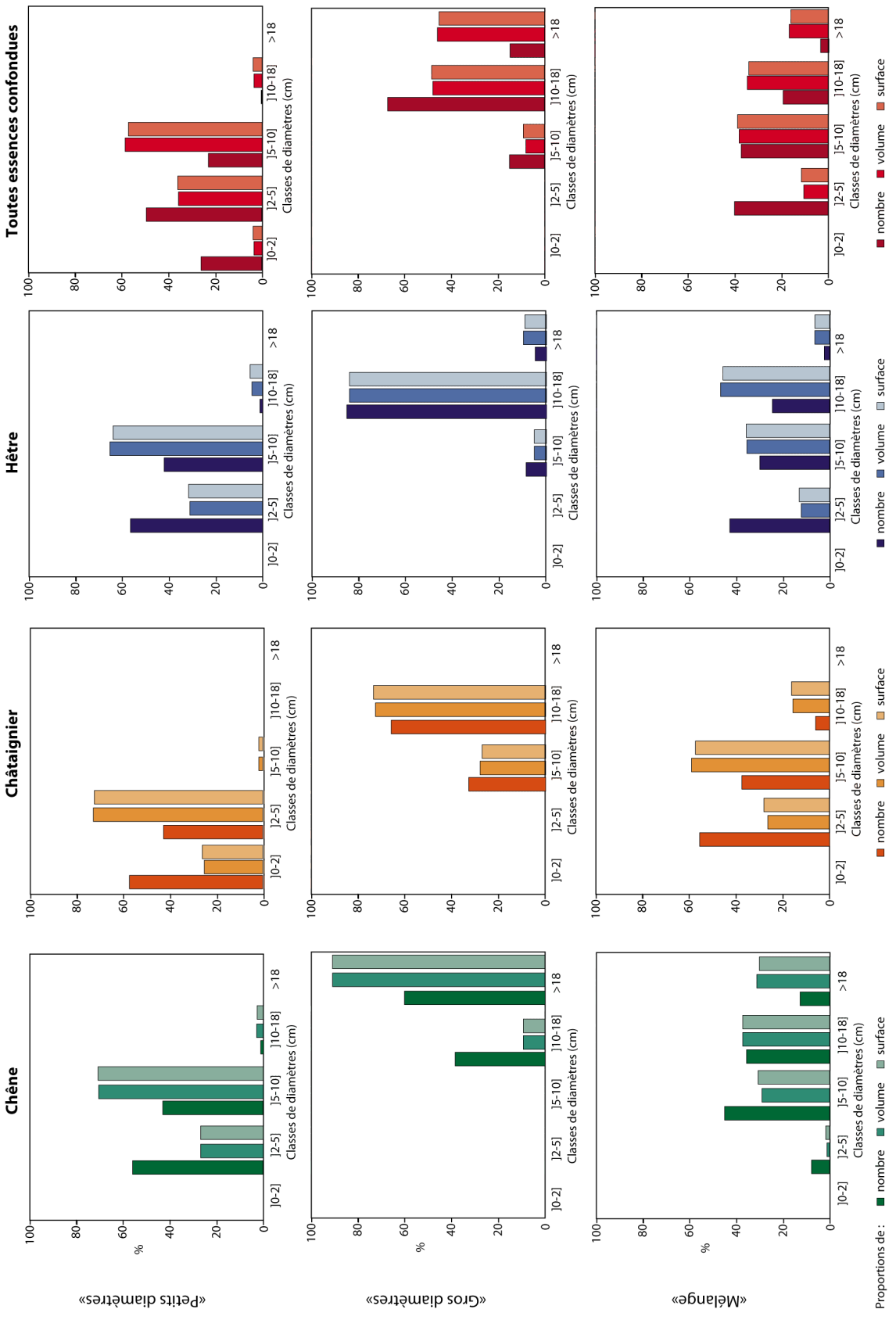


Figure 71 : Présentation des proportions de volume et de surface par classes de diamètre sur les trois charbonnières

Pour cette analyse, le chêne, le hêtre et le châtaignier ont permis de conduire une étude sur le diamètre des bois. En effet, le charme, présent en faible proportion n'a pas permis de mesurer un nombre assez important de charbons pour être bien représentatif du corpus anthracologique. Cette essence a donc été retirée de l'analyse.

La présentation des données connues avant la carbonisation permet de bien mettre en évidence les différences de composition en diamètres dans les trois charbonnières. Si l'on observe les graphiques représentant l'assemblage de toutes les essences (figure 71), on peut nettement distinguer les trois charbonnières par leur profil d'histogrammes radicalement différents. Le détail réalisé pour chaque essence permet également de mettre en évidence une certaine hétérogénéité dans les diamètres employés en fonction des essences. Du fait de la différence d'âge des bois coupés, nous n'avons pas pu avoir des bûches aux diamètres similaires entre les essences. Cela est particulièrement visible sur la charbonnière aux petits diamètres entre le chêne et le châtaignier. Le châtaignier, issu d'un taillis de 12 ans présente une large domination de bûches ayant des diamètres compris entre 2 et 5 cm, alors que le chêne présente de plus grandes proportions de bûches de 5 à 10 cm de diamètres. Ces disparités expliquent la nécessité de travailler d'abord les essences séparément avant d'évaluer la représentativité du spectre global de chaque meule.

A la lecture des graphiques de la figure 71 on constate que, quelle que soit l'essence, les proportions obtenues sur les surfaces et les volumes sont très similaires, moins de 1 % d'écart par classe de rayons. Cela s'explique par l'emploi de bûches calibrées en longueur. En effet, l'ensemble des bûches a été coupé suivant des tronçons d'environ 50 cm de long. L'utilisation de bûches de même longueur n'est pas propre à notre expérimentation. En effet, à la lecture des travaux du XVIIIe siècle ou encore d'études ethnologiques, la majorité des charbonniers emploient des bûches de même longueur pour simplifier l'agencement des bois et la construction de la meule sur plusieurs étages (Duhamel du Monceau, 1774 ; Musset, 1996 ; Battesti, 1992).

Bien que chaque bûche ait été mesurée, numérotée, une imprécision s'est glissée dans notre protocole pour les bûches refendues. Nous l'avons vu lors de l'analyse des spectres anthracologiques (cf, chapitre 3), lors du montage des meules, les fragments d'une même bûche, n'ont pas toujours été tous placés dans la même meule. Cela pose un problème pour connaître les proportions exactes, car les morceaux de bûches ayant été fendus à la

main, ces derniers ne possèdent pas la même proportion de moelle et d'écorce. Il sera donc important de prendre en considération ce phénomène lors des comparaisons entre données avant carbonisation et données issues de l'analyse dendro-anthracologique.

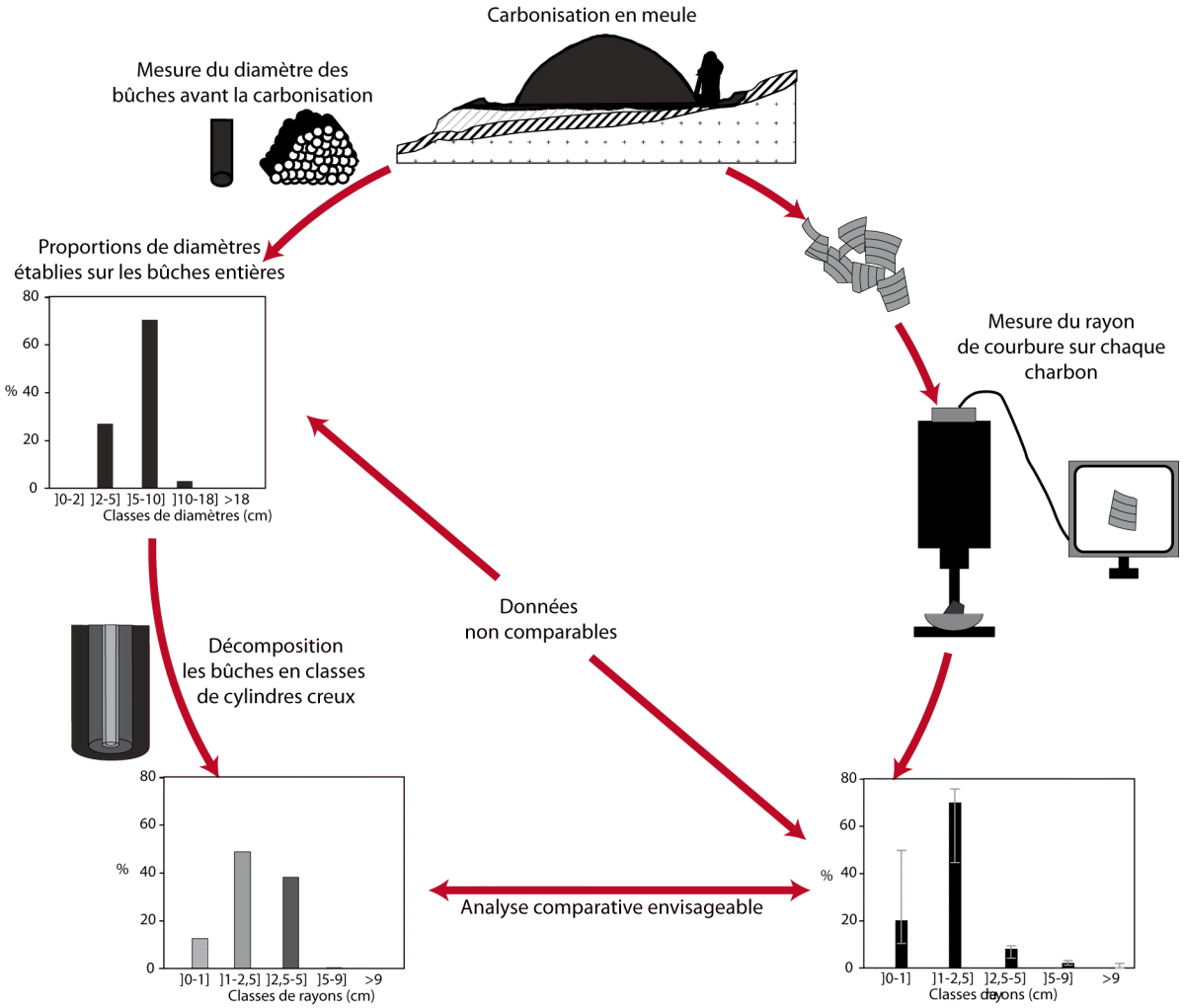


Figure 72 : Explication de la chaîne opératoire pour mener une analyse comparative entre les proportions de diamètres connus dans les charbonnières et les résultats issus de l'analyse dendro-anthracologique

3.1.2. « Décomposer » virtuellement les bûches en classe de cylindres creux

Les proportions de volume et de surface des bois mis dans les meules ne peuvent pas être directement comparées aux proportions obtenues par la mesure du rayon de courbure sur les résidus charbonneux (figure 72). En absence d'écorce, la mesure du rayon de courbure réalisée sur les charbons correspond uniquement à la distance du charbon par rapport à la

moelle du bois. A l'issue de la carbonisation on retrouve donc des fragments de toutes les parties d'une bûche. Pour comparer ces résultats il est nécessaire de décomposer les bûches comme un emboitement de cylindres creux (Dufraisse, 2002, 2006).

a) Utiliser des classes de rayons plutôt que des classes de diamètres

Lors de la « décomposition » virtuelle des bûches en classes de cylindres creux, nous avons préféré employer des classes de rayons plutôt que des classes de diamètres. En effet, lors de l'analyse dendro-anthracologique nous mesurons des rayons de courbure sur les charbons de bois qui nous permettent de construire des spectres basés sur des classes de rayons ; il s'agit donc de présenter de la même manière les données avant carbonisation (figure 72).

De plus, l'utilisation de classes de rayons pour représenter les données issues de l'analyse dendro-anthracologique nous permet de conserver l'utilisation des classes de diamètres pour la restitution du diamètre des bois brûlés, seconde étape à cette étude.

b) Procédure pour calculer les proportions de volume et de surface par classe de rayons

Pour calculer les proportions de volume ou de surface par classe de rayons, nous avons employé les classes précédemment exposées pour les diamètres, mais cette fois-ci exprimées en rayons :] 0-1 cm],] 1-2,5 cm],] 2,5-5 cm],] 5-9 cm] et supérieur à 9 cm.

Prenons l'exemple d'une bûche de 20 cm de diamètre et de hauteur 50 cm (figure 73). Pour calculer les proportions de volume par classe de rayons, équivalentes aux cylindres creux, il est nécessaire de calculer dans un premier temps le volume de la bûche : il correspond à 15 700 cm^3.

Pour obtenir le volume correspondant à la classe de rayons « supérieurs 9 cm », il faut retrancher le volume du cylindre de rayon inférieur. Il s'agit de la classe] 5-9 cm]. Pour cela on calcule le volume du cylindre dont le rayon correspond à la borne supérieure de la classe, c'est-à-dire 9 cm ; il mesure 12 717 cm^3. Les 15 700 cm^3 de la classe « >9 cm » moins les 12 717 cm^3 de la classe] 5-9 cm] donnent 2 983 cm^3. Il faut répéter ce procédé pour chacune des classes de rayons, pour obtenir le volume de chacun des cylindres creux. Il suffit ensuite de les convertir en proportions de volume.

Classes de rayons : cylindres creux (cm)	]0-1]	]1-2,5]	]2,5-5]	]5-9]	>9
Volumes cylindres pleins (cm^3)	$\Pi \times 1^2 \times 50$ = 157	$\Pi \times 2{,}5^2 \times 50$ = 981,25	$\Pi \times 5^2 \times 50$ = 3925	$\Pi \times 9^2 \times 50$ = 12717	$\Pi \times 10^2 \times 50$ = 15700
Volumes cylindres creux (cm^3)	= 157	981,25 - 157 =824,25	3925 - 981,25 =2943,75	12717 - 3925 = 8792	15700 - 12717 = 2983
Proportions de volume par classes de rayons (%)	157 x100/15700 = 1%	824,25 x100/15700 = 5,25%	2943,75 x100/15700 = 18,75%	8792x100/15700 = 56%	2983x100/15700 = 19%

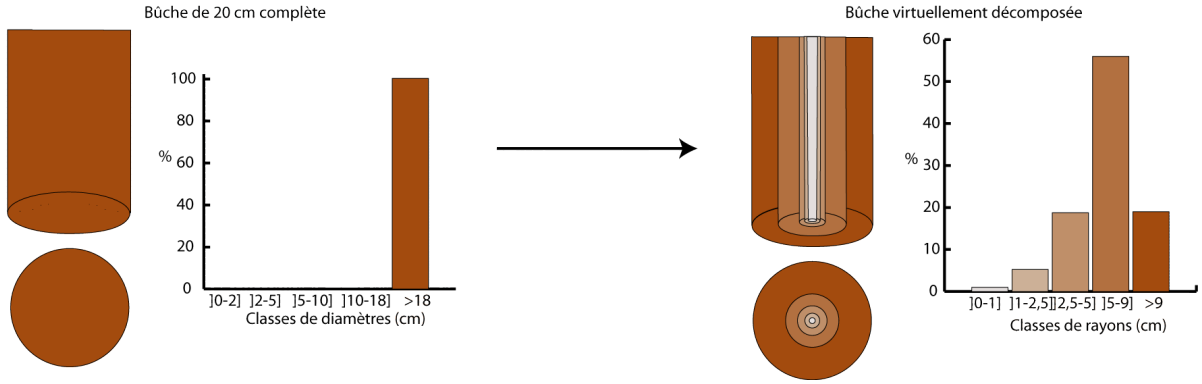


Figure 73 : Exemple de calcul des proportions de volume par classe de rayons pour une bûche de 20 cm de diamètre.

Les proportions de surface par classes de rayons sont établies de la même manière, en retranchant non plus les volumes des cylindres inférieurs mais les surfaces des disques inférieurs.

En calculant les volumes et les surfaces réels par classes de rayons (classes de cylindres creux), la dernière classe est souvent largement diminuée. En effet, il s'avère que les bûches dont le diamètre correspond à la dernière classe sont généralement plus proches de la borne inférieure. Reprenons l'exemple de la bûche de 20 cm de diamètre, son rayon maximal correspond à 10 cm, ce qui est proche de la borne inférieure de la classe « supérieur à 9 cm ». Si l'on calcule le volume de ce cylindre creux on obtient 2 983 cm^3, ce qui ne représente que 19 % de l'ensemble de la bûche. Cette étape de décomposition est primordiale à réaliser pour étudier les proportions attendues par classe de rayons à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique.

c) Résultats de la « décomposition »

A l'issue de la « décomposition » virtuelle des bûches, les diagrammes obtenus sont très différents des proportions établies en fonction des bûches entières (figure 74). Si l'on compare la figure 74 avec la figure 71, on constate que les classes qui étaient majoritaires dans les proportions obtenues sur les bûches entières sont souvent largement sous représentées sur les diagrammes obtenus par classe de rayons. En revanche, les classes de petits rayons souvent faiblement représentées, voire mêmes absentes, dans les diagrammes établis à partir des bûches entières, augmentent largement. Cela est particulièrement visible sur la charbonnière aux gros diamètres qui, à l'origine ne présente aucune bûche inférieure à 10 cm de diamètre. Lorsque les bûches sont virtuellement « décomposées », le cœur des grosses bûches contribue à augmenter les proportions des classes] 0-1 cm] ,1-2,5 cm] et] 2,5-5 cm]. Sur la figure 74 nous avons également représenté les proportions obtenues sur toutes les essences confondues pour donner ainsi un aperçu global de la composition des meules, et surtout des proportions attendues à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique.

A la lecture de ces graphiques, on constate que, malgré la « décomposition » virtuelle des bûches, les trois charbonnières se distinguent toujours. En revanche, sur certaines essences la différenciation n'est pas aussi évidente que sur les proportions établies pour les bûches entières, c'est notamment le cas du hêtre pour les charbonnières aux gros diamètres et celle au mélange de diamètres. Il sera donc important d'être vigilant lors des interprétations des données, et de vérifier que ces deux charbonnières ne se confondent pas.

Pour détailler les résultats obtenus par cette « décomposition » virtuelle, nous nous appuierons sur les données du chêne, essence la plus caractéristique de notre expérimentation (figure 75). En effet, la composition en diamètres de bois de chêne des trois charbonnières est très différente, avec une utilisation de très gros bois pour la charbonnière aux gros diamètres, avec près de 90 % de bûches ayant un diamètre supérieur à 18 cm, contrairement aux deux autres charbonnières qui emploient des bois de plus petits diamètres.

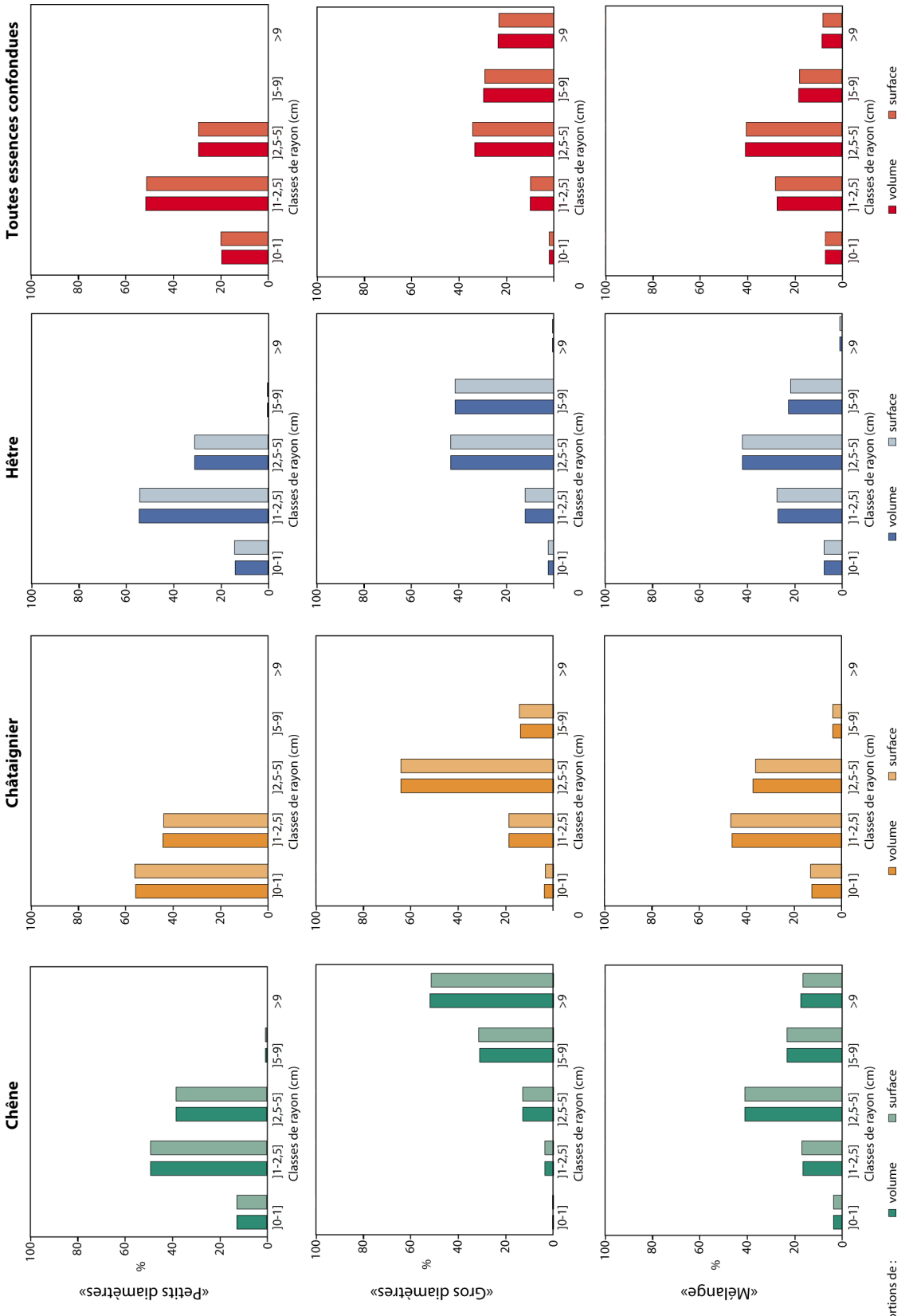


Figure 74 : Diagrammes obtenus à l'issue de la décomposition virtuelle des bûches en classes de cylindres creux.

A l'issue de la « décomposition » virtuelle on constate que les profils des diagrammes ont changé, avec une nette diminution des proportions dans les classes de plus gros rayons, et une augmentation des plus petites classes. La charbonnière aux gros diamètres est probablement la plus marquée, avec uniquement des proportions dans les deux dernières classes de diamètres sur les bûches entières, alors qu'une fois la décomposition appliquée, on observe des proportions de volume et de surface au sein de l'ensemble des classes de rayons. Cela montre ainsi les proportions attendues à l'issue de l'analyse des résidus charbonneux.

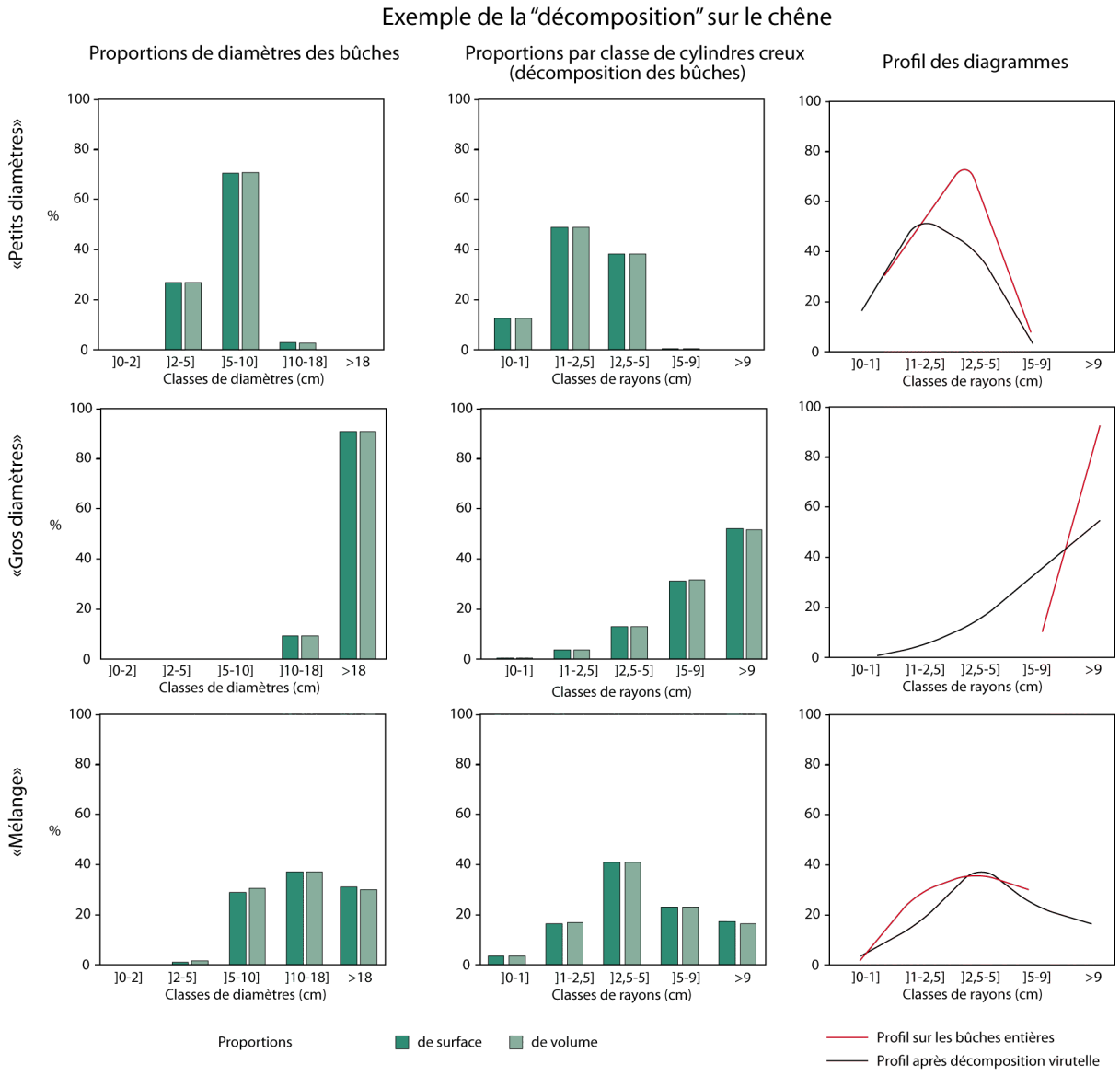


Figure 75 : Comparaison des diagrammes de proportions de diamètres à partir du volume des bûches entières avec ceux obtenus après « décomposition » virtuelle des bûches

La décomposition de chaque bûche en cylindres creux pour obtenir des proportions de volume et de surface par classe de rayon semble longue mais elle est indispensable pour comparer directement les résultats de l'analyse dendro-anthracologiques aux bois mis dans les meules (données connues). Il est primordial de prendre en considération cette sous représentation des classes de plus grand rayon, car si elles sont sous représentées une fois les bûches virtuellement « décomposées », elles le seront également une fois les bûches carbonisées. Compte tenu des très faibles proportions dans certains cas de la dernière classe, il ne faut pas s'attendre à retrouver de nombreux charbons présentant des rayons de courbure correspondant.

3.1.3. Trois charbonnières bien différenciables au niveau des diamètres employés

Cette étape de « décomposition » des bûches est donc primordiale pour établir une comparaison directe entre les données connues et les données issues de l'analyse des charbons. Cependant, s'il était évident de faire graphiquement la distinction entre les trois charbonnières pour chaque essence à partir des proportions de volume ou de surface établies sur les bûches entières, cela est moins flagrant sur les proportions obtenues par classes de rayons et cela principalement pour la charbonnière présentant un mélange de diamètres. En effet, celle-ci se rapproche aussi bien de la charbonnière aux petits diamètres que de celle aux gros diamètres. Cela est logique puisqu'il s'agit d'un mélange de ces deux gammes de diamètres.

Nous avons, par différents moyens statistiques, chercher à mettre en évidence les similitudes et les différences entre les trois meules sur les données avant carbonisation afin d'être le plus critique possible lors de l'analyse des résultats obtenus sur les charbons de bois.

a) Employer des matrices de corrélation

Afin de vérifier la représentativité de chaque histogramme pour chaque charbonnière et chaque essence, les matrices de corrélation, également appelées matrices de « similarité/ dissimilarité » sont un moyen très simple à mettre en place. Le logiciel « Xlstat » propose un

nombre important de méthodes permettant de mesurer la proximité, dont le coefficient de corrélation (plus les variables sont similaires, plus le coefficient de corrélation est élevé). Pour cette étude nous avons privilégié le coefficient de corrélation de Pearson. Nous avons donc testé la similitude par essence pour les trois charbonnières mais par ailleurs des similitudes peuvent être identifiées entre les essences pour une même charbonnière. Les proportions de volume et de surface étant presque identiques les analyses suivantes n'ont été établies que sur les proportions de volume.
Les résultats obtenus montrent que les trois charbonnières se distinguent bien si l'on étudie les trois essences séparément (Annexe 4).

b) Utiliser une analyse factorielle discriminante

Cette approche très théorique et peu visuelle, qu'est la méthode des matrices de corrélation, a été complétée par une Analyse Factorielle Discriminante. Il s'agit d'une méthode de classification « supervisée » (Fisher, 1936). Cette méthode est à la fois explicative et prédictive. L'objectif de cette étude est de déterminer si les groupes que nous avons formés préalablement se distinguent bien les uns des autres.

L'analyse factorielle discriminante projette les points sur différents axes. Dans le cadre de cette étude, seuls deux axes portent l'information. L'axe 1 permet de discriminer principalement nos trois charbonnières (97,49 % contre 2,51 % pour l'axe 2). Cet axe est fortement corrélé avec les classes de diamètres extrêmes : r = 0,55 et 0,66 pour les classes] 0-1 cm] et] 1-2,5 cm] et r = 0-86 pour la classe] 5-9 cm] (figure 76). Ainsi on peut observer en bas à droite les fortes proportions de gros rayons et à gauche les petits rayons.

Une fois les données projetées sur ces deux axes, la répartition des points montre la nette différenciation entre la charbonnière aux petits diamètres (en bleu) et celle aux gros diamètres (en rouge). Au sein de ces groupes, nous avons également distingué les essences par des formes différentes. Cela permet également de montrer les disparités de diamètres par essence au sein de chacune des charbonnières.
La projection des données de la charbonnière aux gros diamètres révèle des données relativement dispersées. Le chêne est assez excentré du reste du groupe, ce qui met bien en évidence les plus fortes proportions de bois de gros à très gros diamètres, alors que le hêtre et le châtaignier présentent des bois de diamètres plus moyens (ils se trouvent plus proches

de l'axe des abscisses). On retrouve le même cas pour le châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres, ce qui met bien en évidence les très petits diamètres employés lors de la construction de la meule (figure 76).

Au centre, en vert, les données provenant de la charbonnière au mélange de diamètres, le nuage de points s'étend du groupe formé par la charbonnière aux gros diamètres au groupe formé par celle constituée uniquement de bois de petits diamètres. Cette disposition centrale met bien en évidence l'emploi de bois provenant des deux groupes, rendant cependant plus difficile la différenciation de la charbonnière au mélange de diamètres des deux autres. Selon les essences la confusion est possible avec l'une ou l'autre charbonnière. Par exemple, le châtaignier se rapproche fortement de la charbonnière aux petits diamètres, et le chêne et le hêtre tendent plutôt vers les bois de gros diamètres. Au sein de la charbonnière au mélange de diamètres on constate également que le chêne et le hêtre se confondent parfaitement, renforçant ainsi nos observations préalablement faites à partir des matrices de corrélation.

Cette Analyse Factorielle Discriminante montre que les trois charbonnières sont nettement différenciables à partir des proportions calculées par classes de rayons à l'issue de la « décomposition » virtuelle. Si les proportions sont conservées après carbonisation alors il devrait être possible de les différencier à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique.

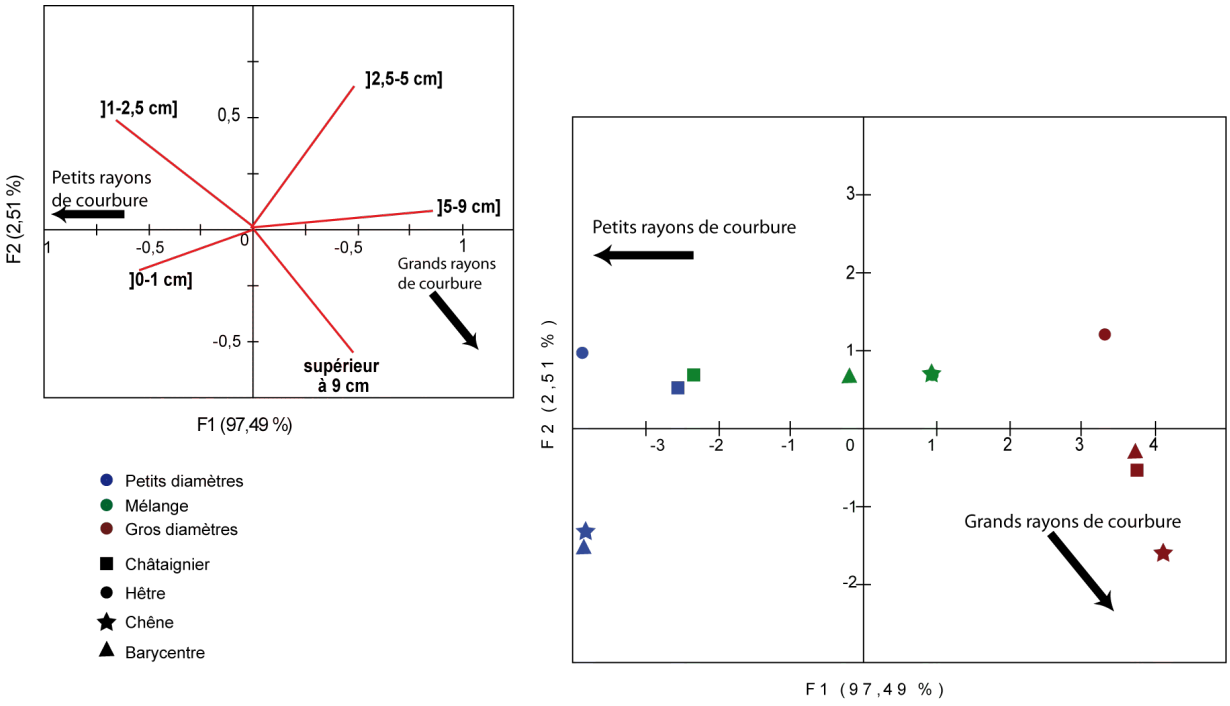


Figure 76 : Analyse factorielle discriminante permettant de mettre en évidence les différences entre les trois charbonnières et également entre les essences.

3.2. Analyse dendro-anthracologique : de la mesure du rayon de courbure à la construction des spectres

Comme pour la détermination des essences, les analyses ont été effectuées sur la fraction résiduelle des charbons, ce qui s'apparente le plus aux vestiges laissés par une activité de charbonnage. Les prélèvements ayant été effectués par quart sur les charbonnières, chaque échantillon a été analysé séparément. Afin d'avoir un lot homogène et pour travailler sur un plus grand nombre de charbons mesurés, les résultats dendro-anthracologiques ont par la suite été associés.

Les proportions de bois étant exprimées en volume et en surface, nous avons mesuré chaque charbon suivant les trois plans (transversal, radial et longitudinal) permettant ainsi d'en calculer la surface et le volume. Pour cette opération, les charbons sont assimilés à des parallélépipèdes, ce qui est rarement le cas. Néanmoins cela permet d'avoir des valeurs certes approximatives mais qui peuvent être directement comparées avec nos données théoriques.

La mesure du rayon de courbure a été réalisée à l'aide de l'application « AnthracoLoJ » sur les charbons présentant des sections transversales supérieures à 2 mm, et surtout ne semblant pas être trop déformés (rayons ligneux sinueux, inversion de la courbure des cernes, fentes de retrait trop importantes…)

3.2.1. Inégalité des essences face à la mesure du rayon de courbure

Sur l'ensemble des charbons analysés, tous n'ont pas pu faire l'objet d'une mesure du rayon de courbure, et l'on constate que les proportions de charbons mesurables sont différentes d'une essence à l'autre.

Le hêtre est l'espèce qui permet le plus grand nombre de mesures, 70 % de charbons déterminés et ayant une section transversale supérieure à 2 mm ont pu être mesurés. Le chêne et le châtaignier quant à eux présentent des rapports beaucoup plus faibles, avec respectivement 45 et 32 % de l'ensemble des charbons analysés.

Le faible nombre de charbons mesurables pour le chêne et le châtaignier peut s'expliquer par la présence d'un nombre important de charbons n'ayant qu'un seul cerne. Dans ce cas, la mesure n'a pas pu être réalisée. La plus grande présence de charbons à un cerne pour ces essences est peut être liée aux importantes zones poreuses dans le bois initial, ce qui

fragiliserait les charbons, augmentant ainsi la fragmentation à ce niveau.
Un autre facteur s'ajoute en ce qui concerne le chêne : les rayons souvent très sinueux empêchent toute mesure d'angle fiable. De plus, ses rayons multi-sériés sont souvent des zones favorables à la création de fentes de retrait, ces zones de fissures sur les charbons sont également à éviter, car cela pourrait fausser la mesure de l'angle.

Pour obtenir suffisamment de charbons permettant de conduire une analyse du diamètre des bois, il est donc nécessaire d'observer un nombre variable de charbons selon les essences.

3.2.2. Des effectifs optimaux rapidement atteints

a) Vérifier si les spectres dendro-anthracologiques sont représentatifs des échantillons prélevés

Comme pour l'analyse anthracologique, il convient de vérifier si les spectres dendrométriques sont stabilisés, indiquant ainsi une bonne représentativité de l'ensemble des résidus prélevés sur les plateformes. Pour cela nous avons utilisé des graphiques représentant l'évolution des proportions à chaque ajout de dix nouveaux charbons, ainsi que des matrices de corrélation mettant en évidence si les proportions obtenues sont similaires ou non.

Pour chaque charbonnière, les charbons étudiés au sein des quatre secteurs d'étude ont été associés pour obtenir un nombre suffisamment important de charbons mesurés par essence. Lors de la construction des graphiques représentant l'évolution des fréquences par classes de rayons, les charbons ont été triés par ordre décroissant de volume.

La figure 77 montre que les fréquences obtenues par classe de rayons se stabilisent assez rapidement sur l'ensemble des charbonnières et quelle que soit l'essence. En combinant l'étude des matrices de corrélation à la lecture des graphiques, on peut évaluer si l'ajout de nouveaux charbons dans l'analyse modifie ou non les proportions de fréquence précédemment obtenues. Pour représenter l'information apportée par les matrices de corrélation, nous avons indiqué au dessus de chaque graphique le nombre de charbons à partir duquel les proportions ne sont plus différenciables statistiquement des proportions finales.

L'effectif optimal est atteint entre 40 et 100 charbons ; au delà, l'ajout de nouveaux charbons ne fait plus varier les proportions des classes de rayons de manière significative. Si le nombre de charbon optimal est relativement faible (moins de 100 charbons), on observe néanmoins des différences entre les trois charbonnières. En effet, sur la charbonnière aux petits diamètres la stabilisation est atteinte beaucoup plus rapidement que sur la charbonnière aux gros diamètres. En effet, à partir de 40 charbons, les proportions n'évoluent plus pour le chêne et le hêtre alors qu'il faut attendre 100 charbons pour le hêtre de la charbonnière aux gros diamètres.

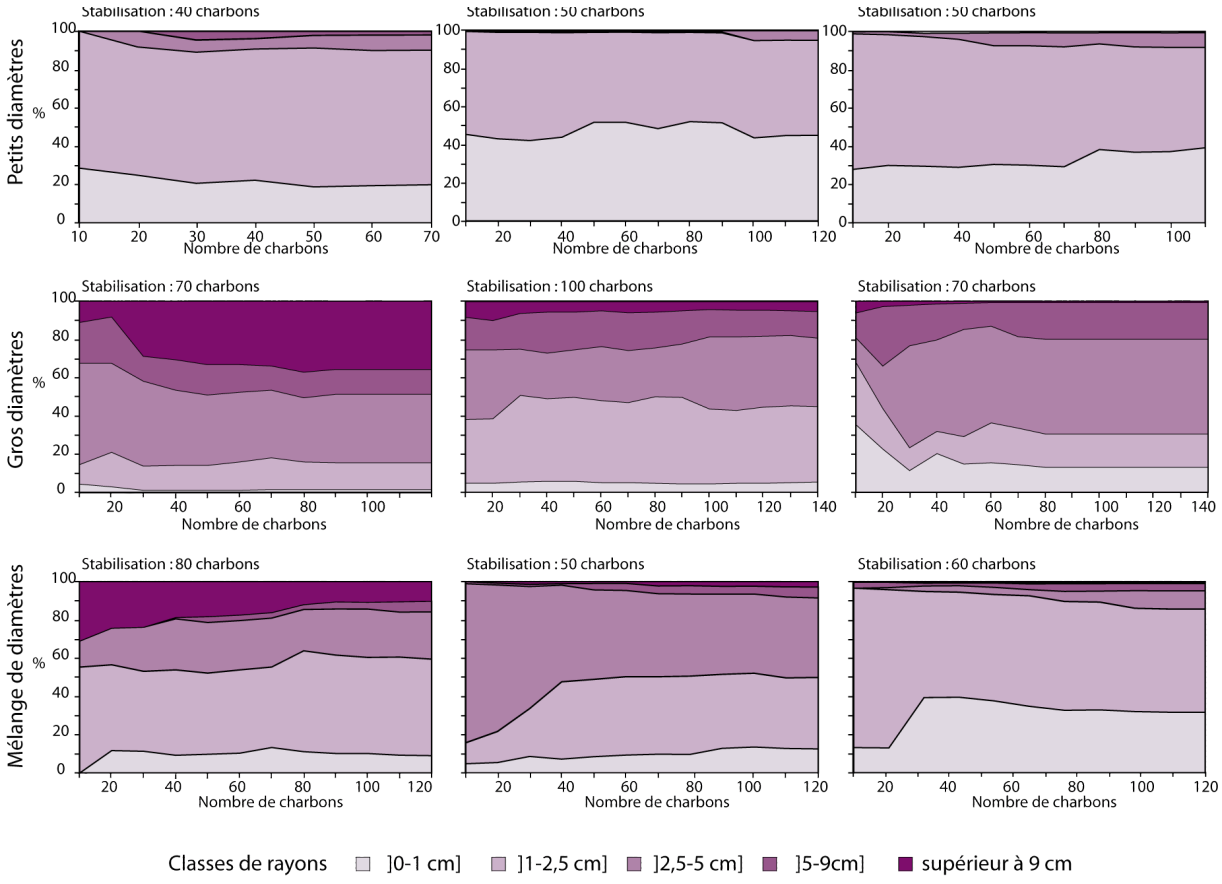


Figure 77 : Graphiques représentant l'évolution des proportions de volume par classes de rayon.

b) Définir un nombre minimal de charbons à étudier sur les corpus archéologiques

Dans le cadre de précédentes expérimentations le nombre minimum de charbons à mesurer par essence avait été établi de 80 à 100 charbons (Dufraisse, 2002, 2006 ; Chrzavzez, 2006 ; Paradis, 2007). Mais tous ces résultats sont issus d'expérimentations dans des contextes de foyers ouverts, similaires à des foyers domestiques. On peut se demander si ces estimations sont également valables sur les contextes de charbonnage.

A la lumière de cette nouvelle expérimentation, nous pouvons affiner cette estimation et surtout proposer un protocole adapté pour vérifier que l'effectif optimal est bien atteint pour chaque échantillon.

On constate que le corpus de charbons à analyser est plus important sur les charbonnières pour lesquelles le nombre de classes de rayons est plus grand. Mais cela n'a rien de surprenant, car l'effectif est lié à la diversité des spectres. Pour les spectres anthracologiques il s'agissait de diversité taxonomique ; dans le cas présent, il s'agit de diversité de classes de rayons. Il est donc nécessaire de mesurer plus de charbons lorsqu'il y a des bois de gros diamètres carbonisés, mais en contexte archéologique il est impossible de savoir si l'assemblage des bois brûlés contenait ou non des bois de gros diamètres. Il semble donc important d'étudier pour chaque corpus l'évolution des proportions en fonction du nombre de charbons, ainsi il sera possible de définir si les proportions obtenues sont représentatives des bois employés.

3.2.3. Présentation des résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique

La mesure du rayon de courbure a pu être réalisée sur 1034 charbons des 3054 charbons déterminés (384 hêtre, 288 châtaignier, 276 chêne et 86 charme) et pour chaque rayon de courbure mesuré nous avons calculé l'erreur associée évaluée précédemment à +/- 26 % (cf, chapitre 3).

a) Représenter les résultats bruts

Pour conserver l'image la plus représentative possible des résultats de l'analyse dendro-anthracologiques, nous avons dans un premier temps représenté les mesures de rayon de courbure de chaque charbon, auxquelles la marge d'erreur de +/- 26 % a été associée (barre d'erreur horizontale). A partir de ces graphiques on peut nettement distinguer la charbonnière aux petits diamètres de celle aux gros diamètres (figure 78).

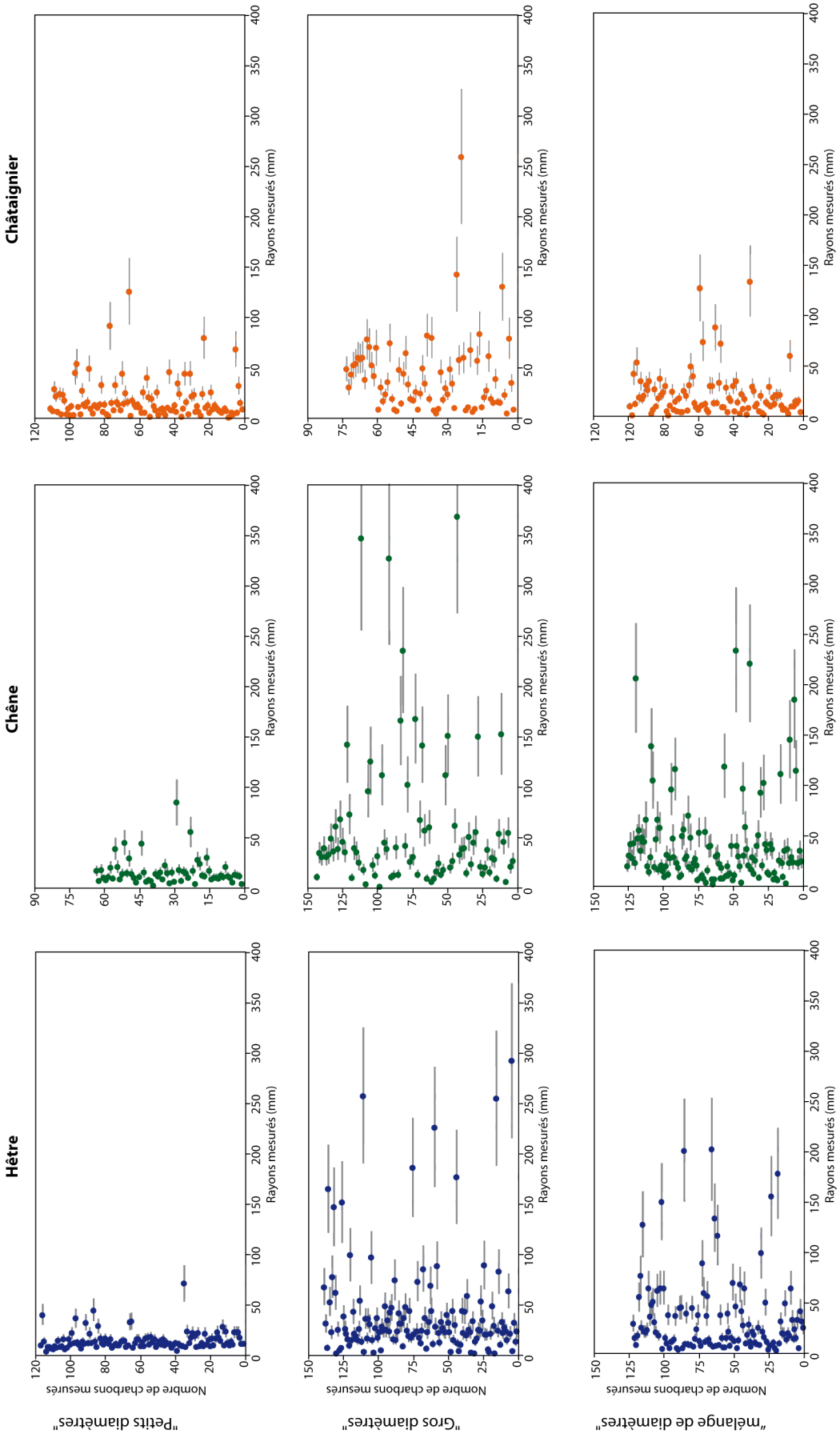


Figure 78 : Présentation de l'ensemble des rayons de courbure mesurés pour chaque charbonnière et pour chaque essence.

Si l'on prend l'exemple du hêtre, la différence est clairement observable avec seulement un rayon de courbure supérieur à 5 cm dans la charbonnière aux petits diamètres, alors qu'on en retrouve de nombreux dans la charbonnière aux gros diamètres.
En revanche, la distinction est moins évidente entre la charbonnière aux gros diamètres et celle présentant un mélange de diamètres. En effet, à la seule lecture de ces graphiques, il est difficile de bien différencier ces deux charbonnières et cela quelle que soit l'essence.

L'observation simplement visuelle des résultats n'est pas suffisante pour reconnaître chacune des charbonnières. Il est donc pertinent de construire des spectres similaires à ceux établis sur les données avant carbonisation en prenant en considération la « décomposition » virtuelle des bûches, c'est à dire en calculant des proportions par classes de rayons.

b) Le nombre, le volume et la surface : trois unités de mesure pour calculer les proportions par classe de rayons

Nous avons donc rassemblé les rayons de courbure mesurés au sein des cinq classes précédemment employées :] 0-1 cm],] 1-2,5 cm],] 2,5-5 cm],] 5-9 cm] et « supérieurs à 9 cm ».

Afin de tester quelle unité de mesure est la plus adaptée pour mesurer le diamètre des bois, nous avons calculé les proportions en fonction du nombre, du volume et de la surface des charbons pour chaque classe de rayons. Cette discrétisation des données, permet ainsi d'avoir une image plus synthétique de la composition en rayons de courbure obtenue à l'issue de l'analyse pour chaque charbonnière et pour chaque essence (figure 79).
Employer trois unités de mesures différentes pour calculer les proportions par classes de rayons permet ainsi d'étudier l'information apportée par chacune d'elle.

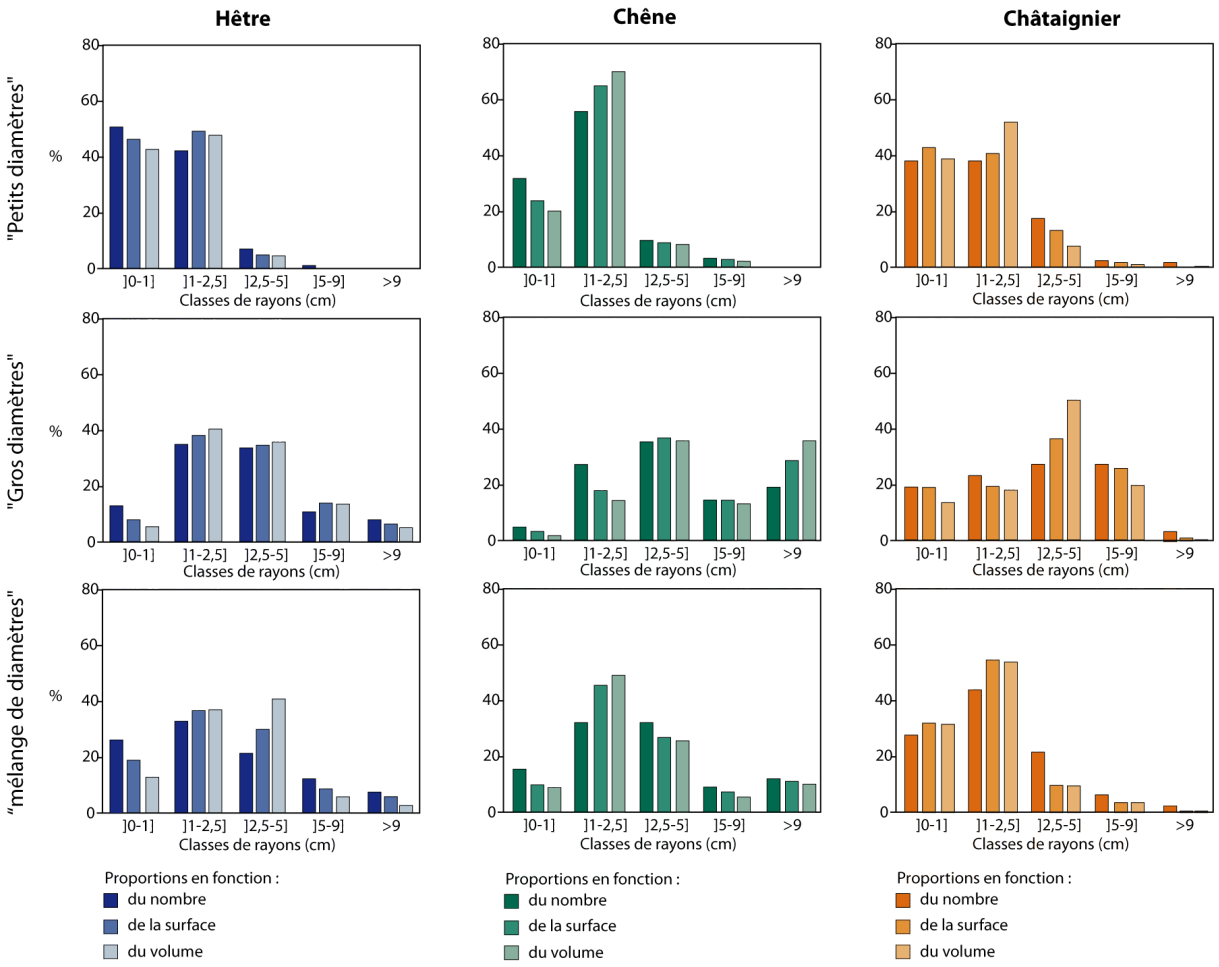


Figure 79 : Proportions par classes de rayons établies en fonction du nombre, du volume et de la surface des charbons

Si l'on prend l'exemple du hêtre, on observe sur les trois charbonnières des résultats très similaires entre les proportions établies en fonction du nombre, du volume et de la surface. Les proportions obtenues à partir des trois unités de mesures présentent généralement moins de 5 % de différence. Seule la charbonnière contenant un mélange de diamètres présente des différences supérieures à 10 %. C'est notamment le cas pour les proportions obtenues à partir du nombre et de la surface dans les classes] 0-1 cm] et] 2,5-5 cm]. On constate une opposition entre ces deux classes ; les proportions obtenues en fonction de nombre sont beaucoup plus importantes que les proportions établies à partir de volume dans la classe] 0-1 cm] alors que le phénomène inverse se produit dans la classe[2,5-5 cm]. Il semblerait qu'il y ait donc plus de petits charbons dans la classe] 0-1 cm] et au contraire de plus gros fragments dans la classe] 2,5-5 cm]. On retrouve ce phénomène également pour le chêne de cette même charbonnière, mais ce sont les classes] 0-1 cm] et] 1-2,5 cm] qui s'opposent cette fois-ci. Le châtaignier présente également ce genre d'écart, particulièrement bien visible sur la charbonnière aux gros diamètres, notamment entre les classes] 2,5-5 cm] et « supérieur à 9 cm ». Mais ce phénomène n'a pas été constaté sur toutes les essences ni

même sur les trois charbonnières ; selon les cas ce sont d'autres classes qui sont affectées. On peut donc exclure un phénomène de fragmentation différentielle selon la distance par rapport au cœur du bois, ce qui est rassurant pour la suite de l'analyse.
Afin de tester la représentativité des spectres, nous avons donc choisi pour la suite de l'étude de comparer l'ensemble des proportions obtenues à partir des trois unités de mesure aux proportions connues avant la carbonisation.

c) Tenir compte de l'erreur associée de +/- 26 % dans le calcul des proportions par classe de rayons

Calculer les proportions en fonction du nombre, du volume ou encore de la surface en utilisant simplement la valeur moyenne du rayon de courbure mesuré n'est pas suffisante. En effet, si l'on tient compte de la marge d'erreur, la mesure du rayon de courbure peut se retrouver dans la classe de rayons inférieure ou supérieure. Prenons l'exemple d'un rayon de courbure mesurant 3 cm. En prenant en considération la marge d'erreur évaluée à +/- 26 %, on obtient un intervalle de confiance compris entre 2,22 cm et 3,78 cm. De ce fait, ce charbon de bois peut être comptabilisé à la fois dans la classe] 1-2,5 cm] et] 2,5-5 cm]. Nous avons donc calculé les proportions en fonction du nombre, de la surface et du volume à la fois sur les bornes inférieures et supérieures des intervalles de confiance de chacun des rayons, ainsi que sur les valeurs moyennes des rayons de courbure. Pour alléger les graphiques, nous avons représenté l'écart entre les proportions minimales et maximales par une barre d'erreur verticale pour chaque barre des histogrammes (figure 80)

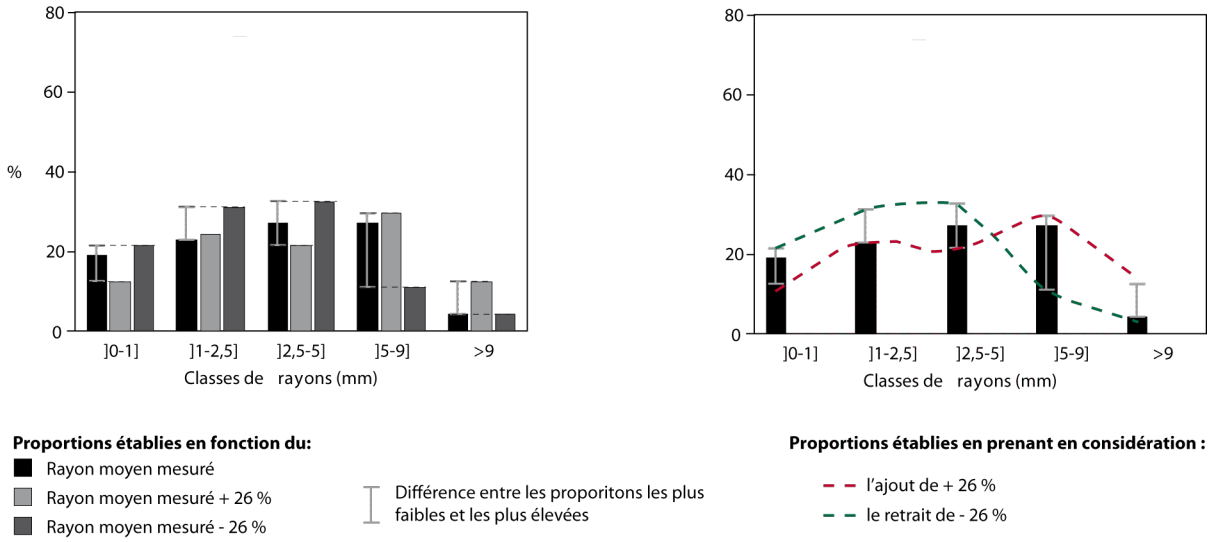


Figure 80 : Explication de la barre d'erreur verticale : différence entre les proportions les plus élevées et les plus faibles obtenues sur les proportions prenant en compte l'erreur associée à la mesure de +/- 26 %

3.3. Tester la représentativité des spectres dendro-anthracologiques

Afin d'évaluer la représentativité des spectres dendro-anthracologiques, nous avons procédé à une analyse comparative entre les résultats issus de la mesure des rayons de courbure sur les fragments de charbon aux données connues avant la carbonisation.

Pour cela nous avons comparé graphiquement et statistiquement (avec des matrices de corrélation et des Analyses Factorielles Discriminantes), les proportions par classes de rayons avant la carbonisation avec les spectres dendro-anthracologiques établis en fonction du nombre, de la surface et du volume. A travers cette analyse nous avons pu définir quelle unité de mesure était la plus représentative, et s'il est important de corriger les données pour obtenir le spectre le plus proche des données connues avant la carbonisation.

3.3.1. Différencier les trois charbonnières à partir des résultats de l'analyse dendro-anthracologique

Dans le cadre de cette étude il s'agit dans un premier temps d'évaluer si à partir des mesures de rayon de courbure réalisées sur les charbons de bois il est possible de différencier les trois charbonnières comme cela a été réalisé pour les données connues avant la carbonisation (cf, 3.1.3).
Pour cela les résultats de l'analyse dendro-anthracologique ont été directement comparés aux données connues avant la carbonisation à travers des Analyses Factorielles Discriminantes. Pour évaluer quel indicateur s'approche le plus des données connues avant la carbonisation nous avons réalisés les graphiques en prenant en considération les trois unités de mesure et en prenant également en compte l'ajout ou le retrait de l'erreur associée évaluée précédemment à +/- 26 % (figure 81). Afin d'en simplifier la lecture les trois meules ont été représentées par un aplat de couleur.

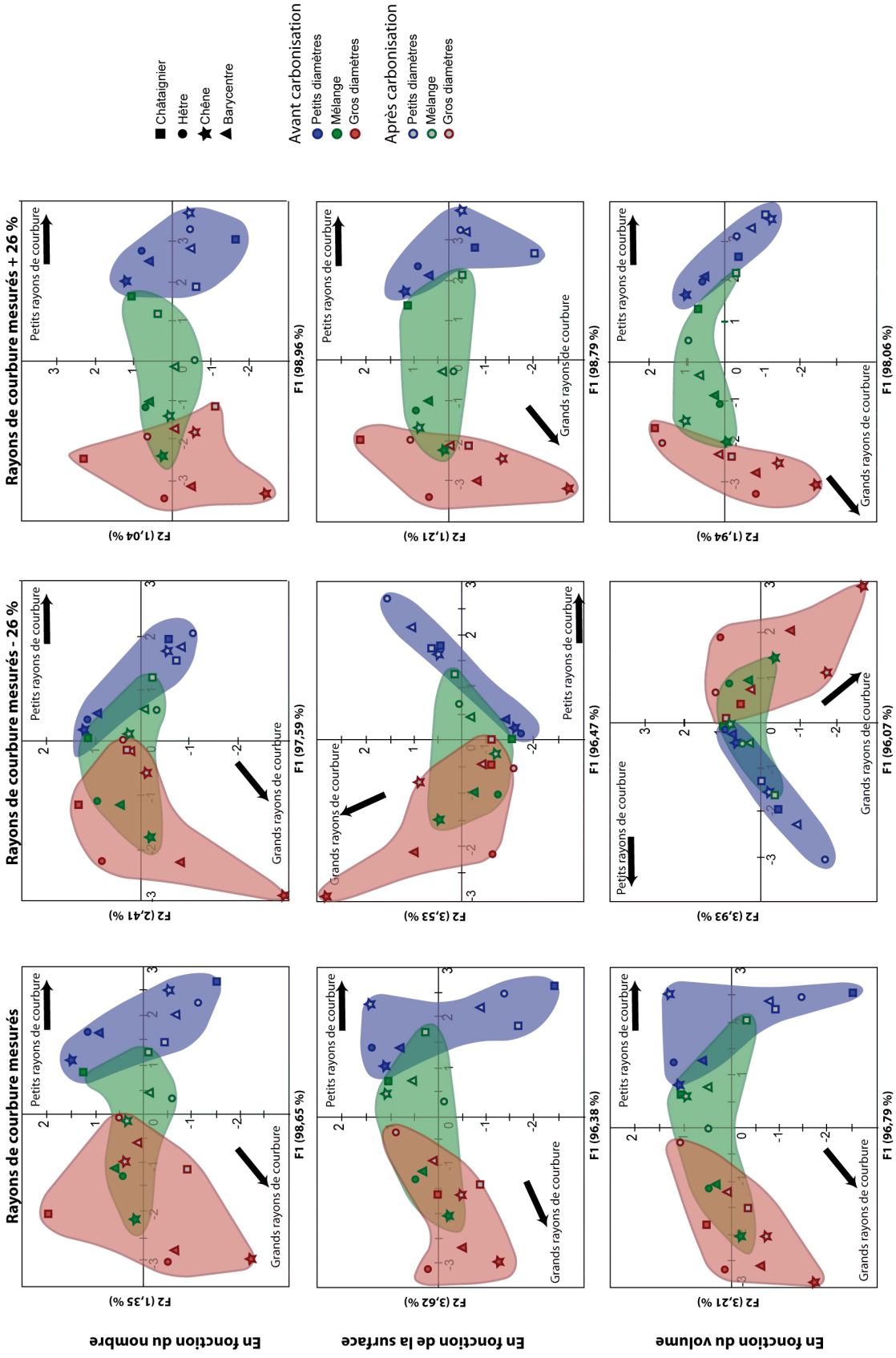


Figure 81 : Analyses Factorielles Discriminantes calculée en fonction du nombre, de la surface, et du volume, en prenant en considération les rayons de courbure moyens mesurés, l'ajout de l'erreur associée et le retrait de l'erreur associée.

Sur les neuf graphiques obtenus la charbonnière aux petits diamètres se distingue bien de la charbonnière aux gros diamètres ; en revanche, les données de la charbonnière au mélange de diamètres peuvent être confondues et cela est plus flagrant sur des proportions établies en fonction des mesures brutes des rayons de courbure ou encore sur celles établies en prenant en considération le retrait de + 26 %. Les données du chêne peuvent être confondues avec les résultats du châtaignier de la charbonnière aux gros diamètres, et le châtaignier peut également être confondu avec les données de chêne de la charbonnière aux petits diamètres. Mais ces ressemblances avaient déjà été évoquées lors de la présentation des données avant la carbonisation.

Il est particulièrement intéressant d'observer que malgré la carbonisation, les résultats issus de l'analyse dendro-anthracologique permettent de différencier un usage de gros bois d'une utilisation de petit bois et permet également de mettre en évidence l'utilisation d'un mélange de diamètres. En revanche on constate à la lecture des graphiques des écarts plus ou moins importants entre les données connues avant la carbonisation (représentées en couleur) et les résultats de l'analyse dendro-anthracologique. De plus ces écarts ne sont pas les mêmes en fonction de l'unité de mesure ni même en fonction de la correction appliquée aux rayons de courbure mesurés. Il convient donc de définir qu'elles sont les proportions permettant de s'approcher le plus des données connues avant la carbonisation.

3.3.2. Corriger les rayons de courbure en ajoutant + 26 %

Les résultats des Analyses Factorielles Discriminantes mettent également en évidence une meilleure distinction des trois meules et des écarts plus réduits lorsque les données ont été corrigées en prenant compte l'ajout de l'erreur associée de + 26 % (figure 80). Ces observations sont d'autant plus visibles à la lecture des graphiques présentant les résultats bruts pour chaque essence et pour chaque charbonnière (annexes 5, 6, 7).

On remarque pour la majorité des essences et pour les trois charbonnières que les proportions établies à partir des valeurs brutes des rayons de courbure présentent systématiquement des proportions plus importantes que les données connues avant la carbonisation dans les petites classes de rayons alors qu'au contraire elles sont sous-représentées dans les classes de grands rayons. Cet écart est renforcé lorsque les données

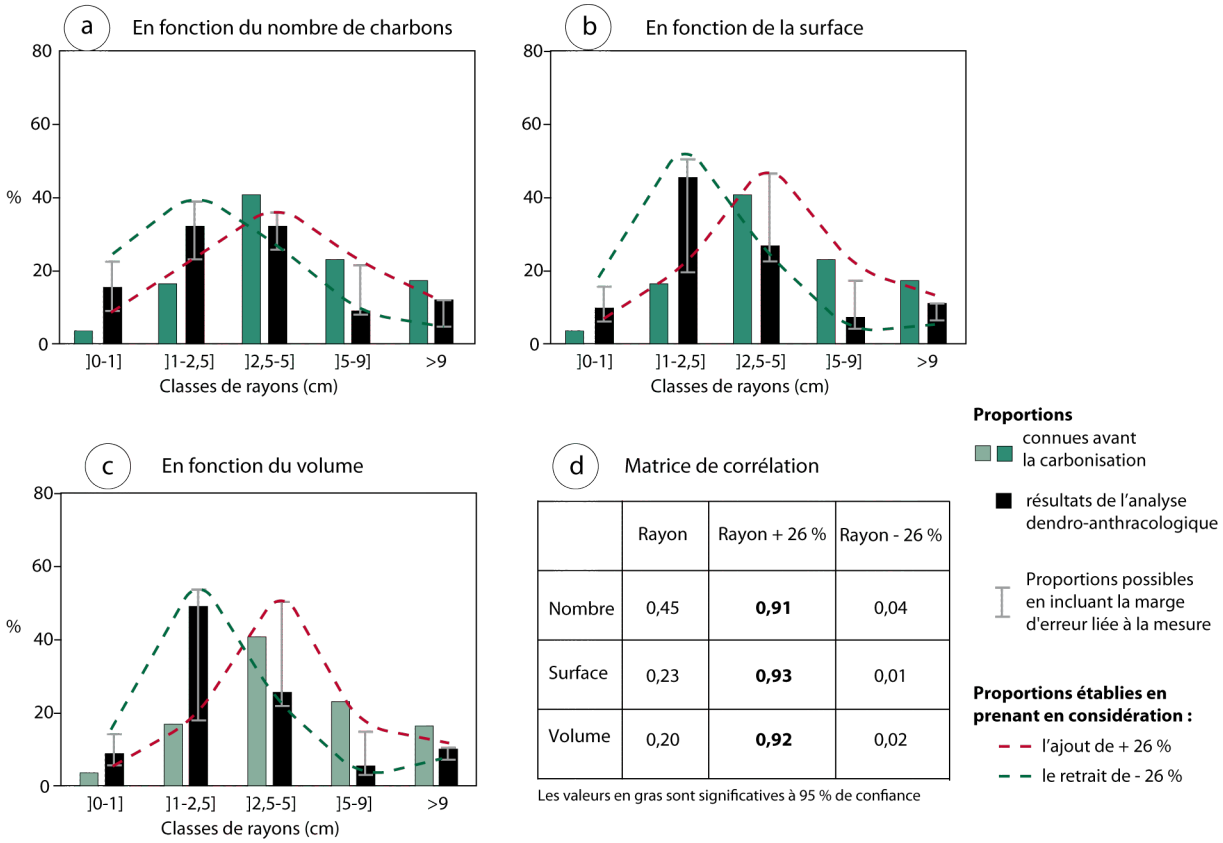
sont corrigées en soustrayant la marge d'erreur (-26 %).

Prenons l'exemple du chêne de la charbonnière au mélange de diamètres (figure 82). On remarque que les classes] 0-1 cm] et] 1-2,5 cm] sont largement surreprésentées alors que les classes] 5-9 cm] et « supérieur à 9 cm » sont sous-évaluées. En revanche en ajoutant + 26 % à l'ensemble des rayons de courbure mesurés on observe des proportions qui s'approchent plus des données connues avant la carbonisation et cela quelle que soit l'unité de mesure employée. Les coefficients de corrélation établis entre les proportions connues avant la carbonisation et les résultats de l'analyse dendro-anthracologiques sont d'ailleurs significatifs uniquement pour ces valeurs corrigées avec + 26 %, (r = 0,91 pour les proportions établies en fonction du nombre, de 0,93 en fonction de la surface, et de 0,92 en fonction du volume).

Seul le châtaignier ne présente pas de meilleurs résultats en utilisant cette correction, nous reviendrons par la suite sur ce cas particulier.

En ce qui concerne le chêne et le hêtre, les très bons résultats obtenus en ajoutant +26 % à l'ensemble des rayons de courbure mesurés s'expliquent assez facilement. En effet sans correction des rayons de courbure on compare des proportions par classes de rayons obtenues sur les bûches entières à des données issues de la carbonisation. La transformation du bois en charbon de bois a forcément conduit à une réduction des tissus du bois sous l'effet de l'évaporation de l'eau ce qui conduit à produire des bûches de diamètres plus petits, ainsi les fragments de charbons de bois mesurés présentent des rayons de courbure plus petits que ceux connus avant la carbonisation.

L'ajout de + 26 %, marge d'erreur certes associée à l'outil de mesure des rayons de courbure « AnthracoLoJ », permet ainsi de compenser en partie le retrait du bois proposant alors des proportions proches des données connues avant la carbonisation. Dans le cadre de leurs travaux A. Dufraisse et M.S. Garcia Martinez proposent de corriger les données avec un ajout de +15 % ou de + 20 %. (Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011).



	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	0,45	**0,91**	0,04
Surface	0,23	**0,93**	0,01
Volume	0,20	**0,92**	0,02

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

Figure 82 : Comparaison des proportions avant et après carbonisation, en fonction du nombre (a), de la surface (b) et du volume (c) pour le chêne pour la charbonnière au mélange de diamètres. (d) matrice de corrélation

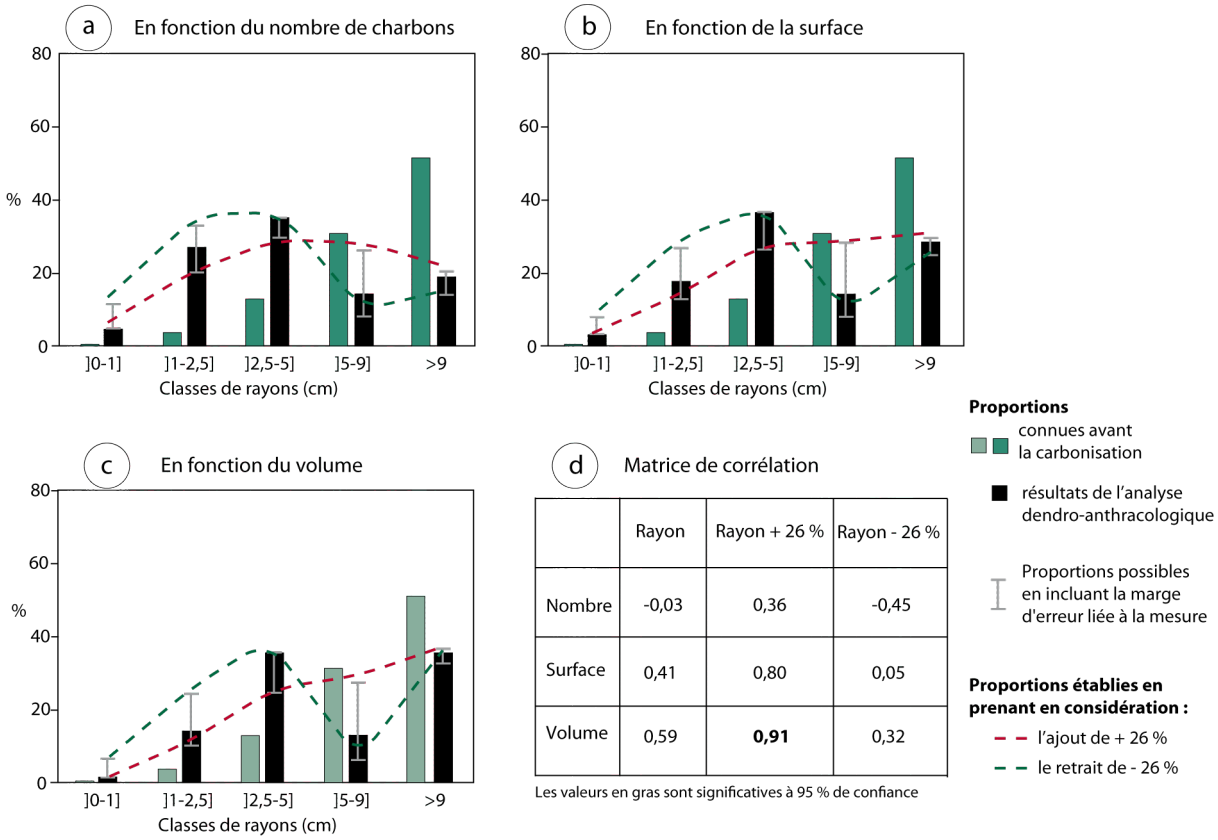
Les travaux sur le retrait du bois en contexte de charbonnage sont encore peu nombreux, les données généralement retrouvées ne précisent pas les contextes de carbonisation et proposent des valeurs très différentes comprises entre 12 et 25 % (Schweingruber, 1978 ; Thinon, 1992). Il est probable que chaque essence réagisse de manière différente face à la carbonisation, entraînant peut être un retrait propre à chacune. Il serait donc important d'évaluer le retrait du bois de chaque essence et cela dans différents contextes de carbonisation pour ensuite adapter au mieux les corrections à appliquer sur les rayons de courbure mesurés.

3.3.3. Le volume, unité de mesure la plus adaptée pour établir les spectres dendro-anthracologiques.

Au cours de cette étude nous avons également pu définir qu'elle était l'unité de mesure la plus adaptée pour obtenir des proportions par classe de rayons s'approchant le plus des données connues avant la carbonisation. Les proportions de volume présentent de loin les meilleurs résultats. En effet, sur les trois essences et pour les trois charbonnières ces proportions sont considérées comme les plus proches des données avant la carbonisation cinq fois sur neuf, alors que la surface présente des résultats similaires dans trois cas et les proportions de nombre dans deux cas.

Cela est particulièrement visible pour le chêne de la charbonnière aux gros diamètres (figure 83) ou encore pour le hêtre de la charbonnière au mélange de diamètres (figure 84). En effet, pour le chêne de la charbonnière aux gros diamètres, seules les proportions de volume permettent d'obtenir des proportions dans la classe « supérieur à 9 cm » proches des données connues avant la carbonisation, ce sont d'ailleurs les seules proportions qui présentent un coefficient de corrélation significatif ($r=0,91$ avec $p<0,001$). Les proportions établies en fonction du nombre et de la surface sont quant à elles sous-évaluées (figure 83).

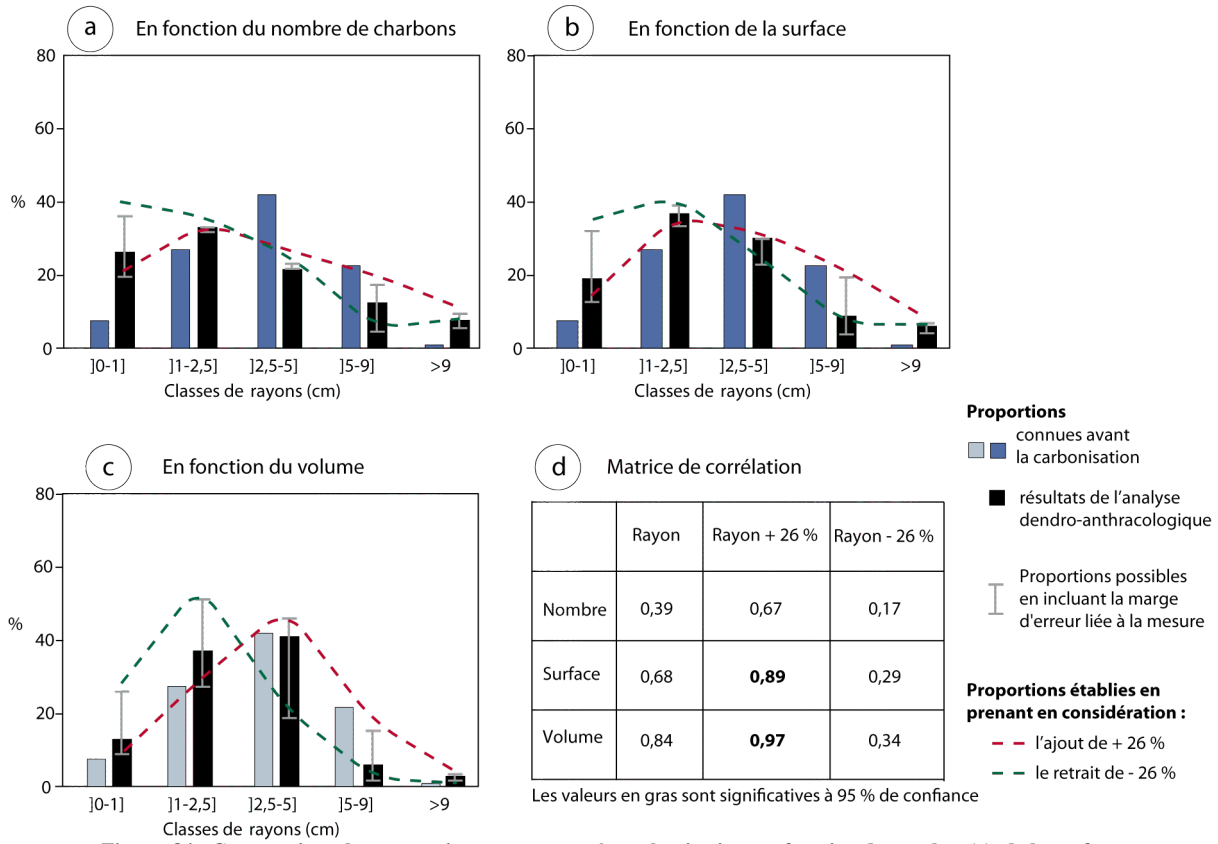
En ce qui concerne le hêtre de la charbonnière au mélange de diamètres, les proportions de surface et de volume présentent des similarités avec les données connues avant la carbonisation, mais au regard des coefficients de corrélation et des graphiques, les proportions de volumes sont plus satisfaisantes (figure 84). En effet, le coefficient de corrélation est plus important et à la lecture des graphiques, les proportions prenant en compte l'ajout de plus 26 %, sont quasiment identiques aux proportions connues avant la carbonisation. Cette légère différence entre proportions de volume et proportions de surface est également constatée sur le hêtre de la charbonnière aux petits diamètres (annexe 5).



	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	-0,03	0,36	-0,45
Surface	0,41	0,80	0,05
Volume	0,59	**0,91**	0,32

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

Figure 83 : Comparaison des proportions avant et après carbonisation, en fonction du nombre (a), de la surface (b) et du volume (c) pour le chêne pour la charbonnière aux gros diamètres. (d) matrice de corrélation



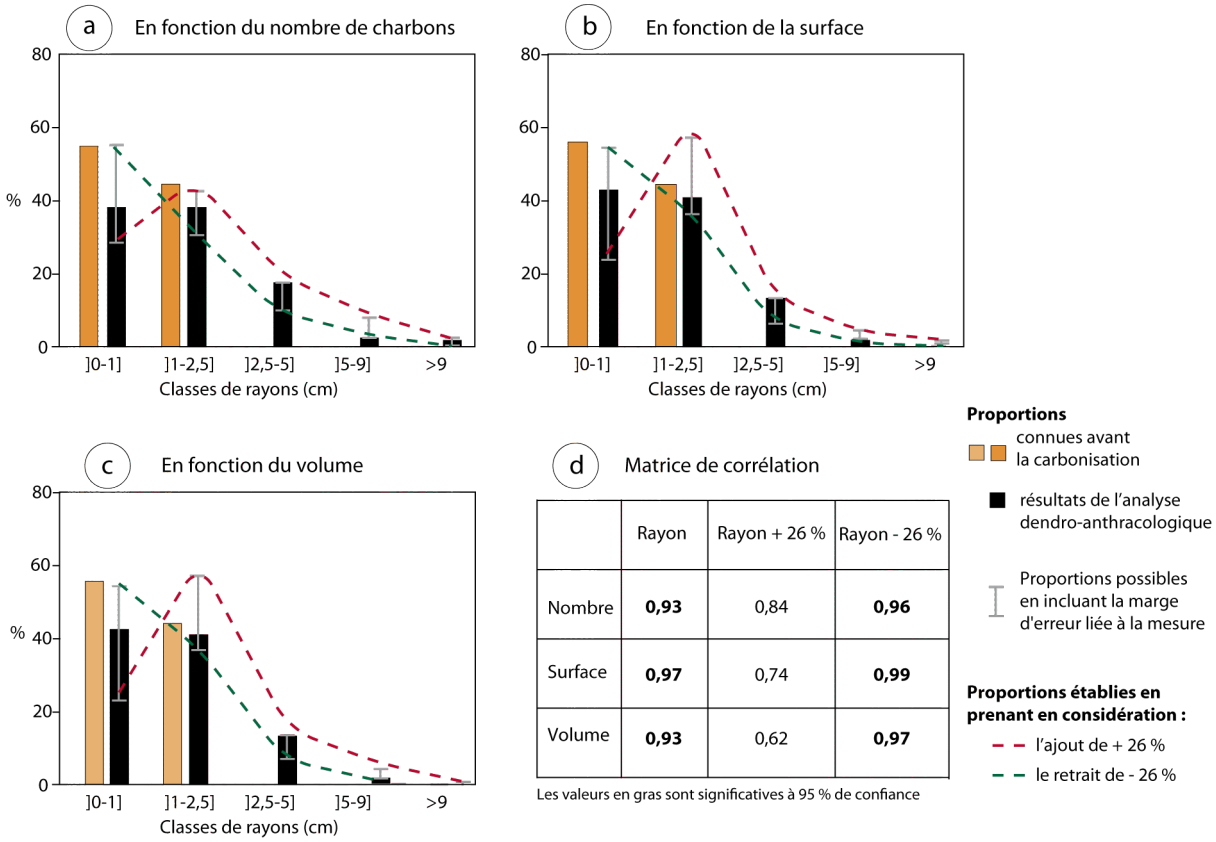
	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	0,39	0,67	0,17
Surface	0,68	**0,89**	0,29
Volume	0,84	**0,97**	0,34

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

Figure 84 : Comparaison des proportions avant et après carbonisation, en fonction du nombre (a), de la surface (b) et du volume (c) pour le hêtre pour la charbonnière au mélange de diamètre. (d) matrice de corrélation

3.3.4. Le châtaignier un cas particulier.

A l'issue de cette analyse, on constate que le châtaignier présente de résultats légèrement différents. Globalement ce sont les proportions obtenues sur les données brutes qui présentent les meilleures résultats, mais l'on constate également que les proportions prenant en considération le retrait de la marge d'erreur (-26 %) présente également de bons résultats notamment pour la charbonnière aux petits diamètres (annexes 5, 6, 7). En effet les résultats obtenus sur cette charbonnière semblent surévaluer les rayons de courbure. On retrouve près de 20 % dans la classe] 2,5-5 cm], et un peu moins de 5 % dans les classes] 5-9 cm] et « supérieur à 9 cm » alors que les bûches de châtaignier mises dans cette meule étaient toutes inférieures à 5 cm (figure 85). .



	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	**0,93**	0,84	**0,96**
Surface	**0,97**	0,74	**0,99**
Volume	**0,93**	0,62	**0,97**

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

Figure 85 : Comparaison des proportions avant et après carbonisation, en fonction du nombre (a), de la surface (b) et du volume (c) pour le châtaignier pour la charbonnière aux petits diamètres. (d) matrice de corrélation.

Les résultats sont plus hétérogènes que ceux obtenus pour le chêne et le hêtre, mais il semble que les données brutes restituent le mieux les proportions connues avant la carbonisation. Compte tenu du faible nombre d'observations il est encore délicat d'expliquer ce phénomène de surestimation des rayons. Est-ce liée à un comportement particulier de cette essence face

à la carbonisation ? Le châtaignier est il moins propice à la mesure de rayon de courbure ? Pour répondre à ces interrogations, il sera nécessaire d'étudier plus en détail le comportement du châtaignier face à la carbonisation et de vérifier plus spécifiquement la précision de l'outil « AnthracoLoJ » sur cette essence

Pour conclure sur cette analyse, les résultats obtenus sont satisfaisants et permettent d'envisager une restitution du diamètre des bois plus sereinement. En effet on retrouve dans la majorité des cas des proportions proches des données connues avant la carbonisation à condition de prendre en considération le facteur correctif de + 26 % pour le hêtre et le chêne et d'utiliser le volume des charbons étudiés. Pour le châtaignier ce sont les données brutes qui restitue le mieux les proportions connues avant la carbonisation.

Conclusion

La mesure du rayon de courbure, à la base des recherches portant sur l'étude du diamètre des bois brûlés, offre aujourd'hui de bons résultats. La comparaison des différentes méthodes de mesure employant un analyseur d'images a permis d'identifier la fiabilité et les limites des méthodes, mettant clairement en évidence la nécessité de privilégier les mesures s'appuyant sur les rayons ligneux et notamment sur l'angle entre les rayons. En effet, « l'outil cercle » présente des résultats insatisfaisants en terme de qualité de la mesure et surtout, il est particulièrement limité sur la taille des échantillons potentiellement mesurables (sections transversales supérieures à 1 cm).

Si les trois méthodes de mesure, s'appuyant sur les rayons ligneux, semblent quasiment aussi performantes pour mesurer le rayon de courbure, pour la suite de l'analyse nous avons privilégié la plus simple à mettre en œuvre. La méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle a ainsi été choisie pour développer un outil de mesure, simplifiant grandement la mesure du rayon de courbure. Cet outil, « AnthracoLoJ », permet d'automatiser la mesure de l'échelle, l'enregistrement des images et des données, ce qui facilite grandement l'acquisition des mesures des rayons de courbure. La mise en place de ce logiciel permet aujourd'hui d'envisager la mesure du rayon de courbure comme une analyse de routine, sans forcement rendre l'analyse beaucoup plus longue que la simple détermination.
Afin de rendre la mesure la plus précise possible, cet outil a été testé sur des sections de bois et des fragments de charbon de bois permettant ainsi d'évaluer la marge d'erreur liée à la mesure du rayon de courbure sur des fragments de bois carbonisés ou non.

Enfin, si l'étude très poussée de la précision des méthodes de mesure est primordiale pour développer des études du diamètre des bois, l'étude d'un corpus anthracologique complet, proche de ceux retrouvés sur les contextes archéologiques nous a semblé importante à développer. Les expérimentations réalisées sur trois charbonnières et sur trois essences différentes ont permis de mettre en évidence la bonne représentativité des spectres dendro-anthracologiques. A partir de cette analyse nous avons pu définir l'unité de mesure la plus adaptée pour chaque essence. Le chêne et le hêtre nécessitent de corriger les données avec un ajout de l'erreur associée (+ 26 %) contrairement au châtaignier qui au contraire présente de meilleurs résultats à partir des données brutes de mesure de rayon de courbure. Compte tenu de ces résultats ainsi que ceux de A. Dufraisse et M.S. Garcia-Martinez, il

semble important de poursuivre ces recherches, pour établir des facteurs correctifs adaptés à chaque essence et pour affiner les connaissances sur le retrait du bois (Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011).

A l'issue de cette analyse nous avons pu montrer la fiabilité des mesures du rayon de courbure, permettant d'obtenir des spectres dendro-anthracologiques relativement proches des proportions connues avant carbonisation. Mais l'analyse ne peut en rester là. En effet, la mesure du rayon de courbure ne permet en aucun cas de retrouver directement le diamètre des bois. Nous l'avons vu, pour comparer les résultats obtenus de l'analyse des charbons de bois, nous avons dû « décomposer » virtuellement les bûches mises dans les meules pour calculer les proportions de surface et de volume par classe de cylindres creux. Retrouver le diamètre des bois consiste, à l'inverse de la « décomposition », à associer virtuellement les rayons de courbure pour obtenir le diamètre des bois mis dans les meules. Procédure encore compliquée qui nécessite l'utilisation de traitements statistiques, l'emploi de modèles mathématiques, le chapitre suivant y sera totalement consacré.

Chapitre 5 : Interpréter les spectres dendro-anthracologiques pour restituer le diamètre des bois

Introduction

Dans le chapitre précédent, il a été démontré qu'à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique des restes charbonneux de l'expérimentation on retrouve globalement les proportions de volume par classe de rayons à condition de prendre en compte la correction adaptée à l'essence, c'est à dire + 26 % pour le hêtre et le chêne et -26 % pour le châtaignier. Mais malgré la représentativité des spectres dendro-anthracologiques, ces résultats ne permettent pas d'accéder directement aux diamètres des bois charbonnés. Cela correspond en effet à l'image des bois « décomposés virtuellement » par classes de rayons. Il s'agit donc de « réassocier » virtuellement les fragments de charbon appartenant à des bûches de même diamètre pour accéder à l'image du diamètre des bois charbonnés.

A ce jour, les recherches portant sur l'étape de restitution du diamètre des bois sont encore peu nombreuses. On connaît deux procédés pour tenter de restituer le diamètre des bois brûlés, tous deux initiés dans les années 2000. Ces derniers ont rapidement été exposés dans le chapitre 3. T. Ludemann et O. Nelle proposent de travailler dans un premier temps sur un diamètre moyen, puis ils comparent les résultats de leurs spectres dendro-anthracologiques avec ceux obtenus sur quatre charbonnières contemporaines pour lesquelles ils connaissaient la composition en diamètres (Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Ludemann, 2006, 2008). A. Dufraisse s'appuie sur un modèle mathématique. Une

table théorique indique les proportions de volume par classe de cylindres creux pour une large gamme de diamètres. C'est donc en comparant les proportions, obtenues à partir de l'analyse dendro-anthracologique, aux données issues de la table théorique, qu'il est possible de « réassocier » virtuellement les charbons ayant des petits rayons de courbure avec des plus grands (Dufraisse, 2002, 2006 ; Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011).

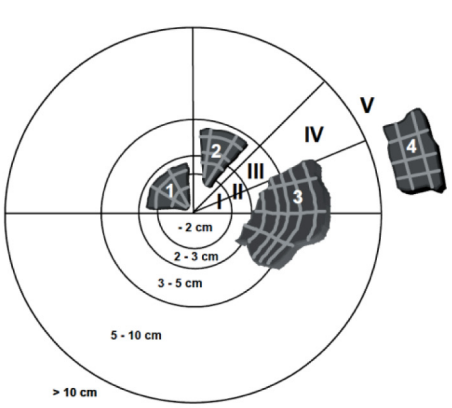
Dans le cadre de ce chapitre, nous avons employé ces deux modèles pour interpréter les résultats de l'analyse dendro-anthracologique des trois charbonnières expérimentales. A l'issue de l'analyse, les trois charbonnières sont toujours identifiables. En revanche, la restitution précise du diamètre des bois employés n'est pas atteinte.

Riches des enseignements acquis à travers les travaux des précédents auteurs, nous avons alors, à travers notre recherche, développé une autre approche, basée à la fois sur une analyse comparative et sur un modèle mathématique. Il s'agit d'élaborer une base de données constituée d'un nombre important de simulations assemblant différentes gammes de diamètres. Pour chaque simulation, les proportions par classes de rayons ont été calculées, ceci permettant d'obtenir des spectres comparables aux données dendro-anthracologiques.

1. Protocole mis en place par O. Nelle et T. Ludemann

1.1. Principes et méthodes

Le modèle proposé par O. Nelle et T. Ludemann (Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Ludemann, 2006, 2008), rapidement présenté dans le chapitre 3, repose sur deux étapes. Dans un premier temps, il est nécessaire de calculer un diamètre moyen à partir de l'ensemble des estimations de distances au cœur réalisées sur les charbons de bois (figure 86). Pour cela, les auteurs utilisent une moyenne pondérée, en s'appuyant sur le nombre de charbons par classes de diamètres et en les pondérant à partir des centres des classes.



Calcul du diamètre moyen à partir d'une moyenne pondérée

$$\text{Diamètre moyen (mD)} = \frac{(nI \times 1 + nII \times 2{,}5 + nIII \times 4 + nIV \times 7{,}5 + nV \times 15)}{N}$$

avec nI 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

Figure 86 : Classes de diamètres employées par O. Nelle et T. Ludemann pour calculer le diamètre moyen (d'après Nelle, 2002, modifié).

Mais finalement le diamètre moyen calculé ne permet pas d'avoir une image précise du diamètre des bois mis dans la charbonnière. En présence d'un mélange de gros et de petits bois, le diamètre moyen ne représentera pas le mélange mais donnera une valeur intermédiaire comprise entre les deux extrêmes. Afin d'obtenir une idée du type de diamètre employé dans les charbonnières archéologiques étudiées, les auteurs comparent les spectres dendro-anthracologiques obtenus sur les charbonnières archéologiques à des spectres de référence obtenus après l'analyse anthracologique de quatre charbonnières contemporaines pour lesquelles ils connaissaient la composition en diamètres (figure 87).

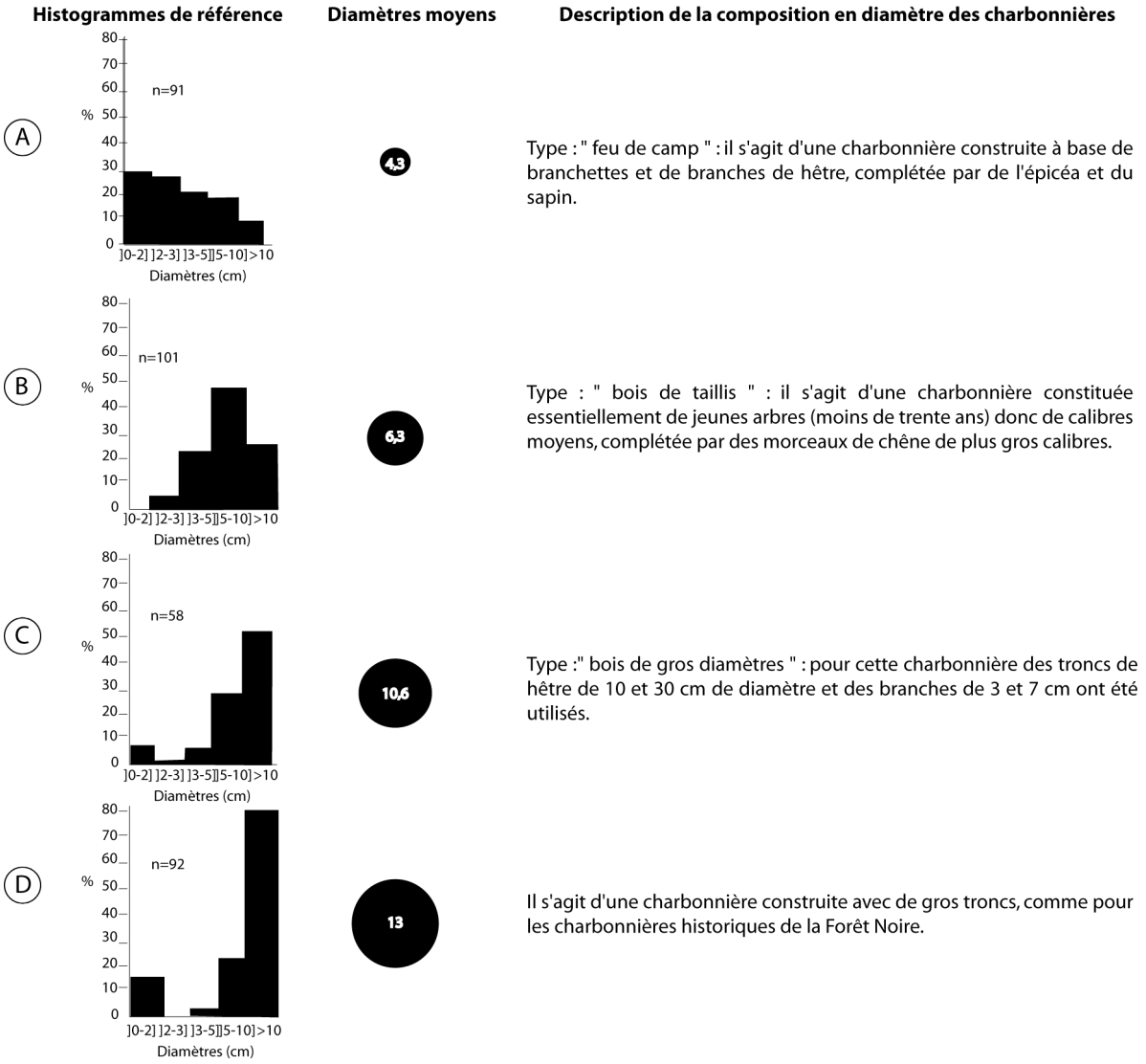


Figure 87 : Histogrammes obtenus sur quatre charbonnières contemporaines pour lesquelles le diamètre des bois employé était bien connu (d'après Nelle, 2002, modifié)

Afin de tester la fiabilité de leur protocole d'analyse, les auteurs ont conduit différentes expérimentations. La première réalisée en 2004 a consisté à prélever des charbons de bois sur une plateforme dont la composition des essences et des diamètres était connue par un sous échantillonnage des bois mis dans la meule. Les spectres dendro-anthracologiques obtenus se sont avérés être assez proches de l'évaluation qu'ils avaient réalisée avant la carbonisation mais sans une parfaite connaissance des bois mis dans la meule il était délicat d'attester de la bonne représentativité des spectres dendro-anthracologiques (Ludemann, 2006).

Dans un second temps, une deuxième expérimentation a été conduite. Cette fois-ci le diamètre des bois charbonnés était parfaitement maitrisé, chaque bûche ayant été mesurée (Ludemann, 2008). L'analyse de 2000 charbons sur l'ensemble des résidus de la plateforme a permis de retrouver les neuf essences et d'étudier précisément la représentativité des spectres dendro-anthracologiques. Après avoir comparé les proportions de volume obtenues par classe de diamètres, le diamètre moyen a été calculé pour chaque essence. Les résultats obtenus sont assez satisfaisants mettant bien en évidence une bonne concordance entre les diamètres moyens connus avant la carbonisation et ceux obtenus à partir de la moyenne pondérée des mesures réalisées sur les charbons de bois. Même s'il est possible, à travers cette analyse de différencier les diamètres de chaque essence employée, en revanche, l'ensemble des diamètres moyens calculés à partir de l'analyse des charbons de bois est inférieur de quelques centimètres aux diamètres moyens connus avant la carbonisation. Cette différence a été expliquée, par les auteurs, par le retrait du bois lors de la carbonisation.

Nous avons donc appliqué cette approche sur les trois charbonnières expérimentales de Pouligny présentées précédemment.

1.2. Application sur les trois charbonnières expérimentales de Pouligny

Afin de respecter l'ensemble du protocole mis en place par les auteurs et surtout pour permettre l'analyse comparative avec les spectres de référence proposés par les auteurs, nous avons dû employer les mêmes classes de diamètres :]0-2 cm],]2-3 cm],]3-5 cm],]5-10 cm] et « supérieur à 10 cm », alors que nous avons précédemment évoqué notre volonté de travailler sur des classes de rayons adaptées à la mesure du rayon de courbure avec l'application « AnthracoLoJ ». En revanche, nous avons tout de même pris en considération l'erreur associée à la mesure du rayon de courbure, évaluée précédemment à +/- 26 %. Chaque calcul a donc été réalisé à la fois sur les rayons moyens mesurés, et sur les valeurs minimales et maximales obtenues après ajout et retrait de la marge d'erreur.

1.2.1. Calculer le diamètre moyen

Pour calculer le diamètre moyen, de la même manière que Ludemann et Nelle, nous avons replacé chaque rayon de courbure dans la classe de diamètres correspondante, pour compter le nombre d'individus par classe. Ainsi à partir de ces données nous avons pu, pour chaque essence et pour chaque charbonnière, calculer à l'aide d'une moyenne pondérée le diamètre moyen (figure 86). Afin de vérifier si les données obtenues à l'issue de l'analyse des charbons de bois étaient similaires aux données avant carbonisation, nous avons également calculé les diamètres moyens des bûches avant la carbonisation. Afin d'obtenir des données comparables à celles réalisées à partir de l'analyse des charbons de bois, nous avons aussi calculé le diamètre moyen connu à partir d'une moyenne pondérée. Pour cela, chaque bûche a par ailleurs été replacée dans la classe de diamètres.

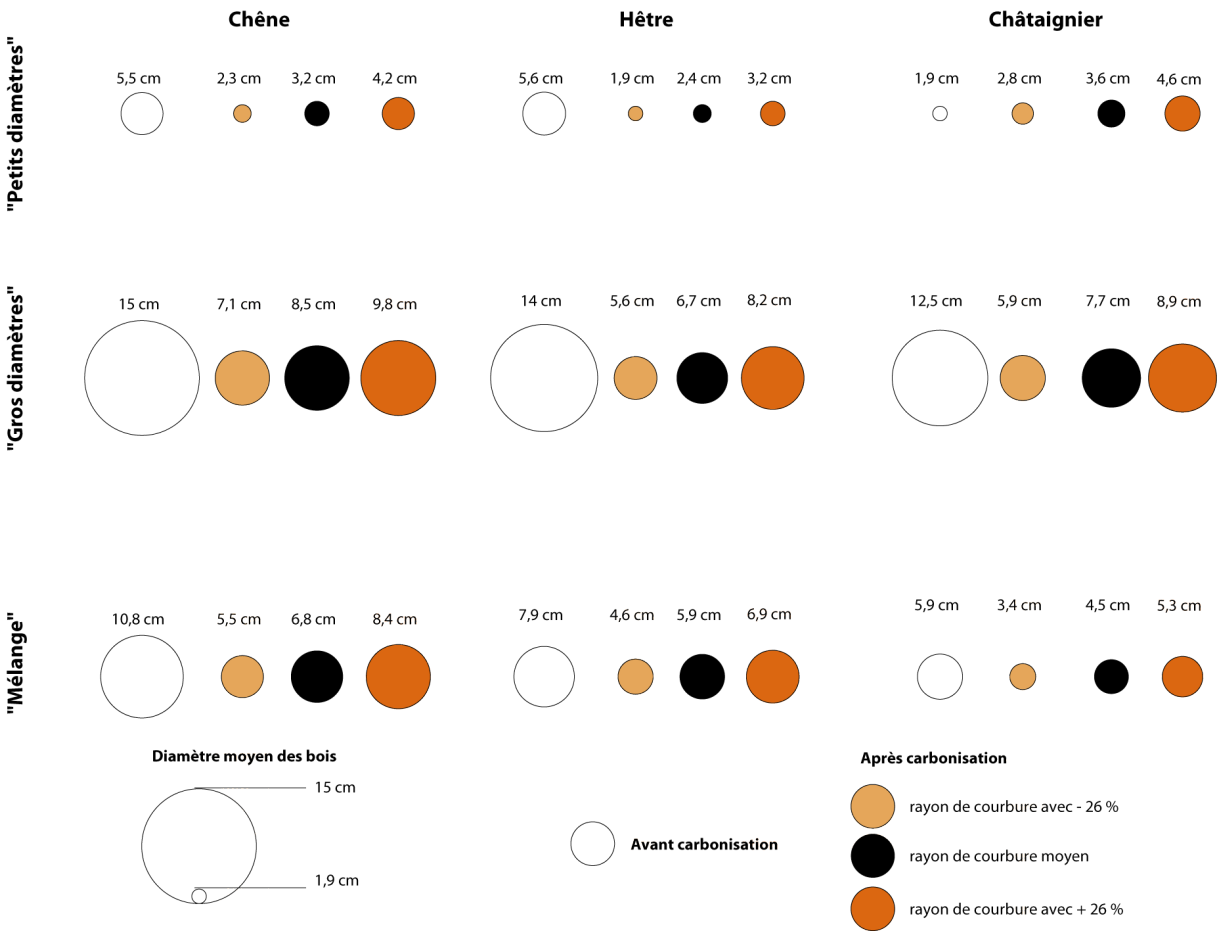


Figure 88 : Représentation des diamètres moyens obtenus sur les bûches avant la carbonisation et sur les résultats de l'analyse dendro-anthracologique en utilisant une moyenne pondérée

Les résultats proposés (figure 88) permettent une distinction significative entre les trois charbonnières. Pour chaque essence, les diamètres moyens obtenus sur la charbonnière aux petits diamètres sont plus petits que ceux obtenus sur la charbonnière au mélange de diamètres et même très largement par rapport aux diamètres moyens de la charbonnière aux gros diamètres.

Si l'on compare les diamètres moyens obtenus à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique avec ceux connus avant la carbonisation, on observe des écarts importants. Les diamètres calculés à l'issue de l'analyse des charbons de bois sont souvent deux fois plus petits que les diamètres des bois connus avant la carbonisation. Cette sous-estimation du diamètre des bois peut s'expliquer par la perte au feu et le retrait du bois lié au processus de carbonisation mais on peut également envisager que le mode de calcul puisse influencer les résultats.

Seules les mesures réalisées sur le châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres présentent un diamètre moyen supérieur à celui connu avant la carbonisation. Mais ces résultats sont cohérents avec nos précédentes observations. En effet, nous avions constaté que le châtaignier présentait des rayons de courbures supérieurs à ceux connus avant la carbonisation.

Nous l'avons vu précédemment, l'ajout de l'erreur associée de + 26 % permet dans de nombreux cas de compenser les écarts et donc de prendre en compte le retrait du bois. Mais, à la lecture de ces résultats, les écarts restent tout de même assez importants et notamment pour la charbonnière aux gros diamètres. On peut alors se demander si cela ne provient pas également de la décision d'utiliser une moyenne pondérée pour calculer le rayon moyen. L'utilisation d'une moyenne pondérée est en effet problématique, notamment pour la restitution des plus gros diamètres. En effet, les auteurs regroupent tous les diamètres supérieurs à 10 cm dans une même classe ouverte. Pour calculer le diamètre moyen, le coefficient de pondération de cette classe est de 15 cm. On constate à travers cette analyse que ce choix conduit à sous-estimer les diamètres moyens des essences placées dans la charbonnière aux gros diamètres. Prenons l'exemple du hêtre et du chêne ; les diamètres moyens calculés avant la carbonisation à partir de la moyenne pondérée sont peu différents, 15 cm pour le chêne et 14 cm pour le hêtre. Or, on sait que les diamètres de bois de ces deux

essences étaient très différents, les bûches de chêne étant beaucoup plus grosses que celles de hêtre. Lorsque l'on calcule les diamètres moyens à partir des données brutes, c'est à dire en utilisant une moyenne arithmétique, cette différence est bien marquée avec un diamètre moyen de 21,6 cm pour le chêne et un de 12,9 cm pour le hêtre.

Les résultats obtenus en réalisant les calculs à partir de la moyenne arithmétique sont bien plus satisfaisants que ceux acquis à l'aide de la moyenne pondérée. En effet les diamètres moyens restitués à partir des rayons de courbure mesurés sont plus proches des données connues avant la carbonisation (figure 89). On observe même, dans de nombreux cas, de très bons résultats lorsque l'on prend en compte l'ajout de l'erreur associée de + 26 % sur les mesures. C'est notamment le cas du châtaignier dans la charbonnière aux gros diamètres, pour lequel on ne retrouve plus que 1 cm d'écart entre le diamètre connu et le diamètre calculé, ou encore le cas du chêne de la charbonnière au mélange de diamètres qui présente un peu plus de 1 cm d'écart.

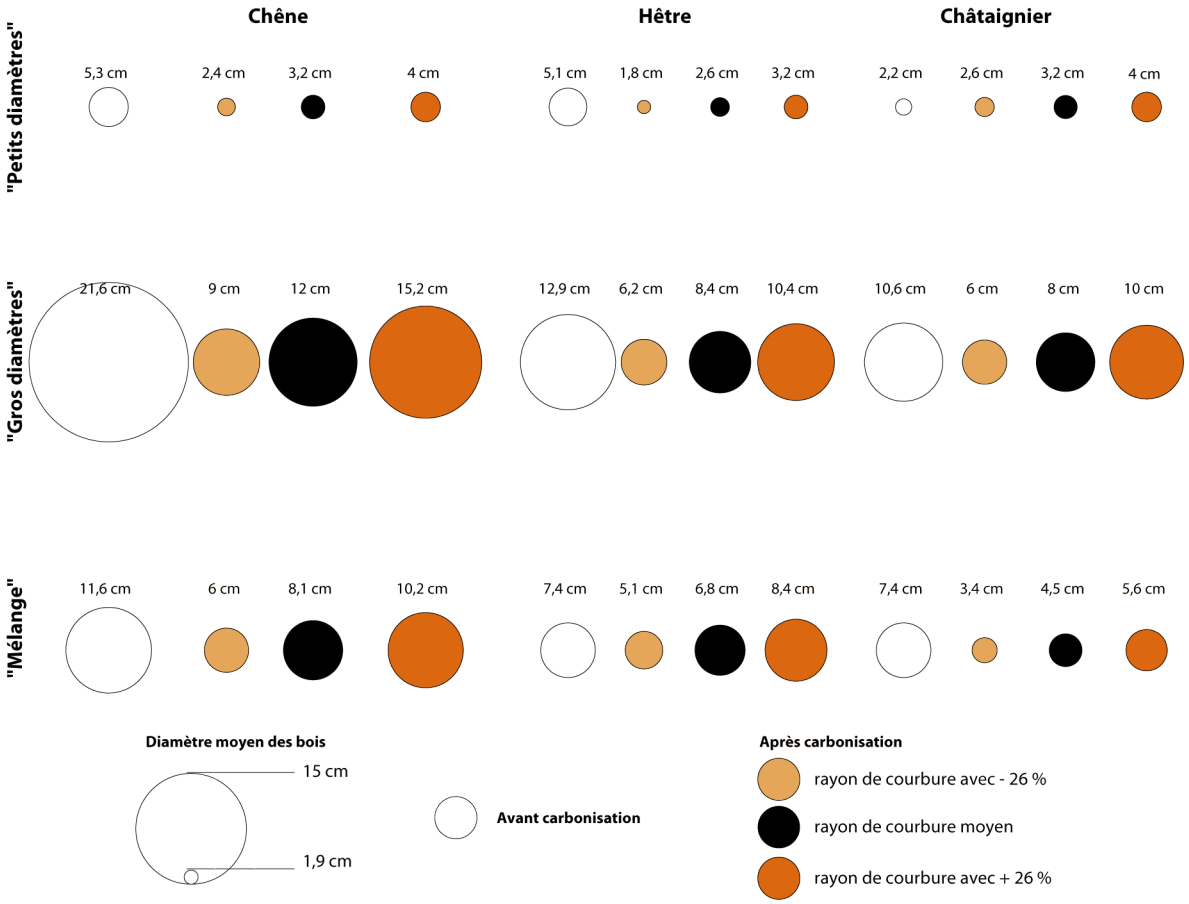


Figure 89 : Représentation des diamètres moyens obtenus sur les bûches avant la carbonisation et sur les résultats de l'analyse dendro-anthracologique calculés à partir d'une moyenne arithmétique

Il est également intéressant d'étudier de près les résultats obtenus sur le hêtre de la charbonnière au mélange de diamètre. En effet, les valeurs calculées sur les résultats bruts de la mesure des rayons de courbure et sur ceux prenant en compte l'ajout de + 26 %, encadrent le diamètre moyen connu avant la carbonisation.
Seul le chêne de la charbonnière aux gros diamètres montre encore des écarts importants entre le diamètre moyen connu avant la carbonisation et ceux issus de l'analyse dendro-anthracologique ; on retrouve plus de 5 cm d'écart. Mais nous l'avons vu précédemment, le chêne de la charbonnière aux gros diamètres a fait l'objet d'une erreur lors du choix des bûches pour construire la meule. Tous les morceaux d'une même bûche n'ont pas été forcément placés dans la même charbonnière. Cela peut expliquer en partie cette très large sous représentation du diamètre moyen à l'issue de l'analyse des charbons de bois ; il est probable qu'un grand nombre de morceaux provenant des parties périphériques des bûches n'ait pas été placé dans la charbonnière.

A l'issue de cette analyse, il semble donc préférable, dans la mesure du possible, de travailler sur les données brutes pour calculer le diamètre moyen plutôt que d'utiliser une moyenne pondérée. Cette approche nécessite alors d'utiliser des méthodes de mesure plus précise que les cibles graduées.

1.2.2. Comparer les spectres dendro-anthracologiques des charbonnières de Pouligny aux spectres de référence de O. Nelle et T. Ludemann

Pour compléter l'analyse et étudier la présence de mélange de diamètres de bois, les spectres obtenus à partir de l'analyse des charbons sont ensuite comparés aux quatre spectres de référence établis par O. Nelle et T. Ludemann sur des charbonnières contemporaines présentées précédemment (Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002).
Compte tenu des observations réalisées dans le chapitre 4 l'ensemble des rayons de courbure mesurés a été corrigé. Il convient de travailler à partir des données brutes pour le châtaignier et d'ajouter + 26 % pour le chêne et le hêtre. Les histogrammes des figures 5, 6 et 7 représentent les proportions du nombre de charbons par classes de rayons une fois les corrections appliquées. Toutefois pour représenter les marges d'erreur liées à la mesure nous avons indiqué par les barres d'erreur verticales les valeurs.

Chaque charbonnière sera présentée individuellement, permettant ainsi de définir si l'image proposée par la comparaison avec les histogrammes de référence permet d'accéder à l'image des bois mis dans les charbonnières.

a) La charbonnière aux petits diamètres

A l'issue de l'analyse des charbons de bois de la charbonnière aux petits diamètres, les histogrammes obtenus s'approchent plus de la charbonnière de référence A (figure 90). Cette dernière, composée essentiellement de branchettes et de branches de hêtre, présente donc des bûches essentiellement de petits diamètres.

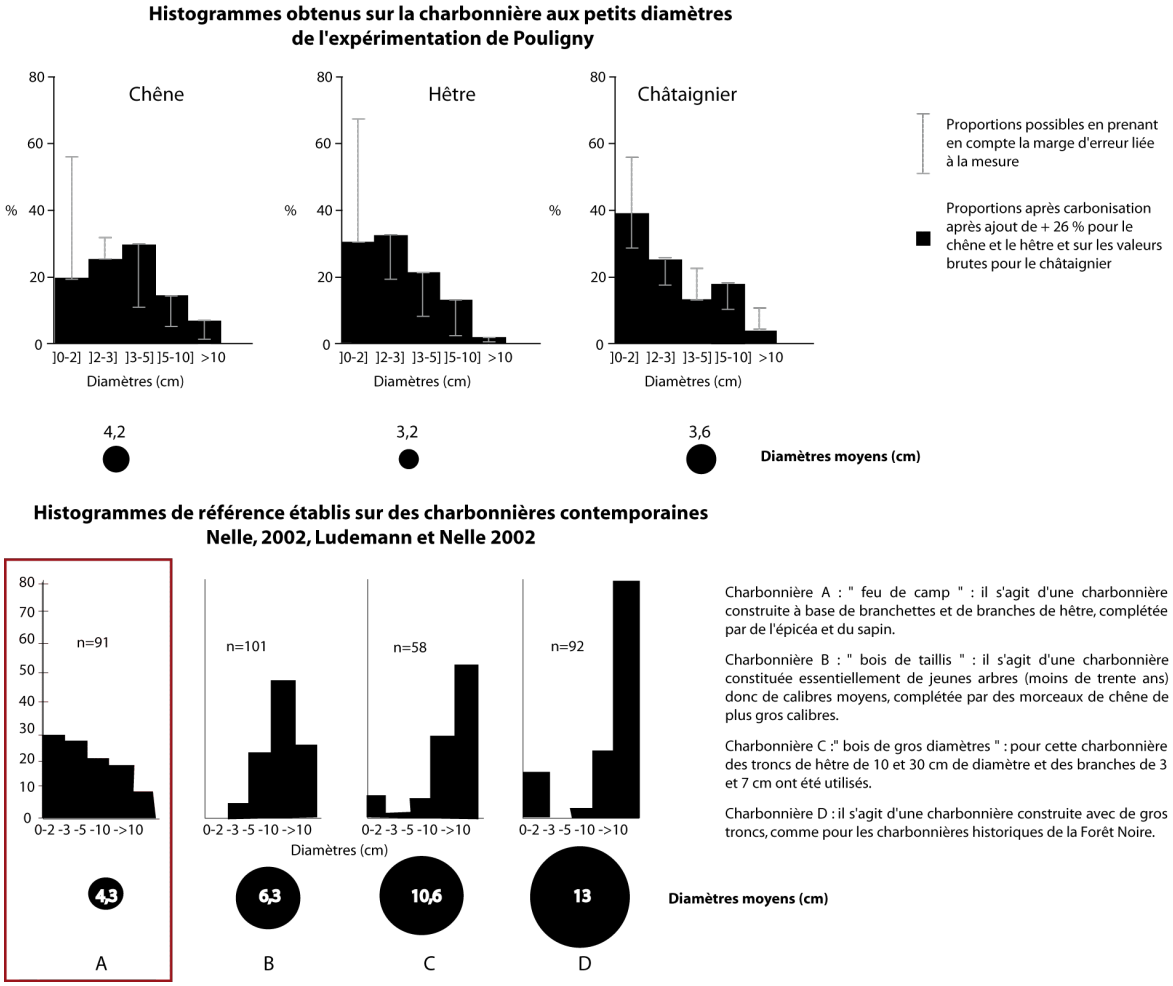


Figure 90 : Comparaison des spectres issus de l'analyse dendro-anthracologique de la charbonnière aux petits diamètres aux quatre histogrammes de référence de O.Nelle et T. Ludemann

Cela correspond bien à l'image des bois mis initialement dans la charbonnière aux petits diamètres de notre expérimentation. Si l'on compare les spectres obtenus entre les trois essences, on peut tout de même constater des différences de diamètres. En effet, les spectres obtenus sur le chêne et le hêtre présentent moins de charbons dans la classe] 0-2cm] que le châtaignier. Ces différences de profils révèlent des diamètres de bois différents. En effet, les importantes proportions de charbons dans la classe de diamètres] 0-2 cm] et]2-3 cm] pour le châtaignier résultent d'une utilisation essentiellement de bois de diamètres plus petits que les deux autres essences. On peut également différencier le chêne du hêtre, le chêne présentant de plus fortes proportions dans la classe] 3-5 cm] alors que le hêtre présente de plus fortes proportions dans la classe]2-3 cm]. S'il est possible de différencier ces trois histogrammes, en revanche pour l'interprétation en diamètre de bois employés nous sommes limités à la seule description de la charbonnière de référence A.

b) La charbonnière aux gros diamètres.

Les résultats obtenus sur la charbonnière aux gros diamètres permettent également une comparaison avec les charbonnières de références (figure 91).

Les profils croissants obtenus pour le chêne et le châtaignier sont similaires à la charbonnière de référence C, qui représente une utilisation de bois de gros diamètres compris entre 10 et 30 cm, avec un ajout de branches de plus petits diamètres de 3 et 7 cm. L'association aux charbonnières de références présentant des bois de gros diamètres correspond bien aux diamètres des bois employés dans cette charbonnière ; en revanche, nous n'avons pas employé de bois inférieur à 10 cm de diamètre ce qui semble ressortir à l'issue de l'analyse comparative. Il est assez surprenant que le châtaignier s'associe à la même charbonnière de référence que le chêne. En effet, lors de la construction des meules nous avons eu du mal à trouver des bûches ayant des diamètres supérieur à 10 cm, dans la majorité des cas les diamètres étaient compris entre 10 et 15 cm.

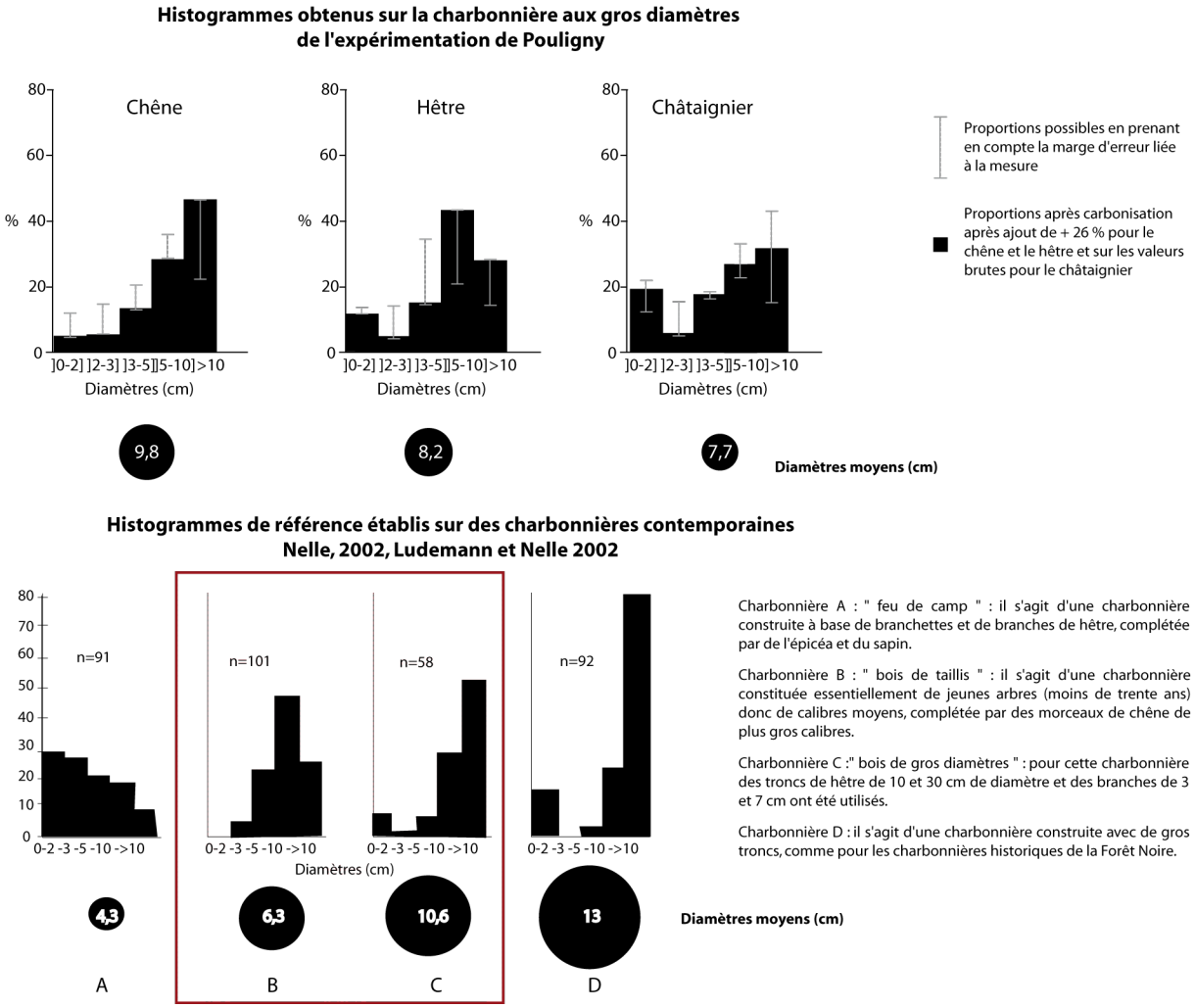


Figure 91 : Comparaison des spectres issus de l'analyse dendro-anthracologiques de la charbonnière aux gros diamètres aux quatre histogrammes de référence de O.Nelle et T. Ludemann.

En ce qui concerne le hêtre, le profil est légèrement différent, il est croissant jusqu'à la classe] 5-10 cm], mais la classe « >10cm » présente des proportions moins importantes. De ce fait, les résultats s'apparentent plus à la charbonnière B, qui représente une utilisation de bois de taillis de trente ans correspondant à des bois de diamètres moyen ; sans valeur de diamètre précise, cela semble toutefois correspondre à l'image des bois de hêtre mis dans cette charbonnière.

c) La charbonnière au mélange de diamètres

Enfin, en ce qui concerne la charbonnière présentant un mélange de diamètres, l'interprétation est un peu plus complexe ; on retrouve trois cas de figures très différents (figure 92). Les résultats obtenus sur le chêne peuvent être associés à la charbonnière de référence B, voire à la C du fait du profil croissant. La morphologie de l'histogramme et le

diamètre moyen correspondent bien à une utilisation de bûches de bois de diamètres moyens avec un ajout de quelques bois de plus gros diamètres.

Le châtaignier, quant à lui, s'approche plutôt de la charbonnière A, c'est à dire à une utilisation de bois de petits diamètres, mais cela ne correspond pas aux diamètres des bois employés dans cette charbonnière. En effet, toutes les gammes de diamètres de châtaignier ont été employées lors de la construction.

Le hêtre, quant à lui, est plus compliqué à associer à une des quatre charbonnières de référence. En effet, le profil relativement plat de l'histogramme ne s'apparente à aucun des histogrammes de référence.

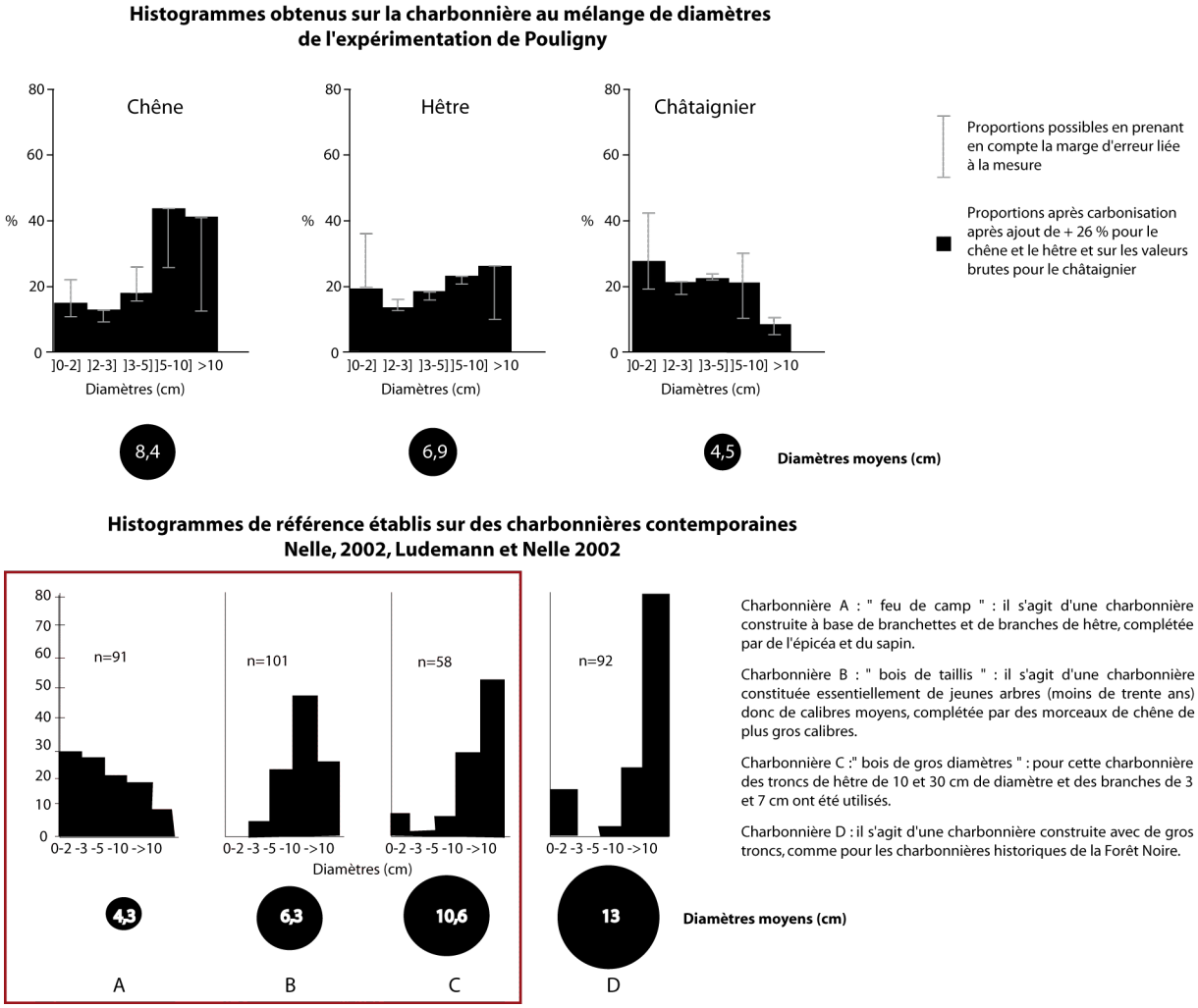


Figure 92 : Comparaison des spectres issus de l'analyse dendro-anthracologique de la charbonnière au mélange de diamètres aux quatre histogrammes de référence de O.Nelle et T. Ludemann

Ces quatre charbonnières de référence ne permettent pas de représenter une grande variété d'assemblage de diamètres, ce qui explique la difficulté d'associer certains résultats obtenus sur les charbonnières expérimentales.

A l'issue de cette analyse les charbonnières aux petits et aux gros diamètres peuvent être différenciées à travers les interprétations réalisées à l'aide des histogrammes de référence. En revanche, il s'agit d'une restitution assez floue ; sans valeur de diamètre précise et sans la présentation des proportions de chaque gamme de diamètre dans le cas de mélanges il est impossible de se représenter une image fiable du diamètre des bois employés.

Si le protocole mis en place par Ludemann et Nelle permet d'avoir une image globale du diamètre des bois mis dans les charbonnières, en revanche, il est impossible d'obtenir une vision fine de la composition en diamètres des bois employés. Il est alors délicat de proposer une interprétation sur de possibles mélanges de diamètres de bois.

2. Protocole mis en place par A. Dufraisse

2.1. Principes et fonctionnement

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, un autre modèle pour interpréter les spectres dendro-anthracologiques a été développé par A. Dufraisse. Ce dernier vise à associer des charbons ayant des petites distances par rapport au cœur avec des charbons qui en présentent de plus grandes, en considérant qu'une bûche d'un diamètre important produit à la fois des charbons de petits et de grands rayons de courbure (Dufraisse, 2002, 2006 ; Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011). Ce modèle prend en compte le phénomène de fragmentation des bois à l'issue de la carbonisation. Il nous semble important de rappeler ici le principe ainsi que le fonctionnement de ce modèle avant de l'appliquer sur les résultats de l'analyse dendro-anthracologique conduite sur les trois charbonnières expérimentales de Pouligny.

L'auteur part du principe qu'une bûche, à l'issue de la carbonisation, présente des charbons ayant un rayon de courbure compris entre 0 et le diamètre de la bûche.
En prenant ce phénomène en considération, on prend bien conscience que les spectres dendro-anthracologiques ne reflètent pas directement le diamètre des bois charbonnés mais plutôt le résultat de la « décomposition » des bûches en classes de cylindres creux. Dans le chapitre précédent nous avons pris en compte ce paramètre pour comparer les spectres dendro-anthracologiques aux proportions par classes de cylindres creux connues avant la carbonisation. Pour ce modèle l'auteur utilise également un découpage en classe de diamètres :] 0-1,5 cm],] 1,5-5 cm],] 5-10 cm],] 10-15 cm],] 15-20 cm],] 20-25 cm] et] 25-30 cm].

Pour tenter de restituer le diamètre des bois brûlés ainsi que la proportion de chaque diamètre formant le mélange, l'auteur a construit une table théorique « décomposant » virtuellement des bûches de 1,5 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm et 30 cm de diamètre, tout en faisant également varier les proportions de chaque classe de diamètres de 1 à 100 %.

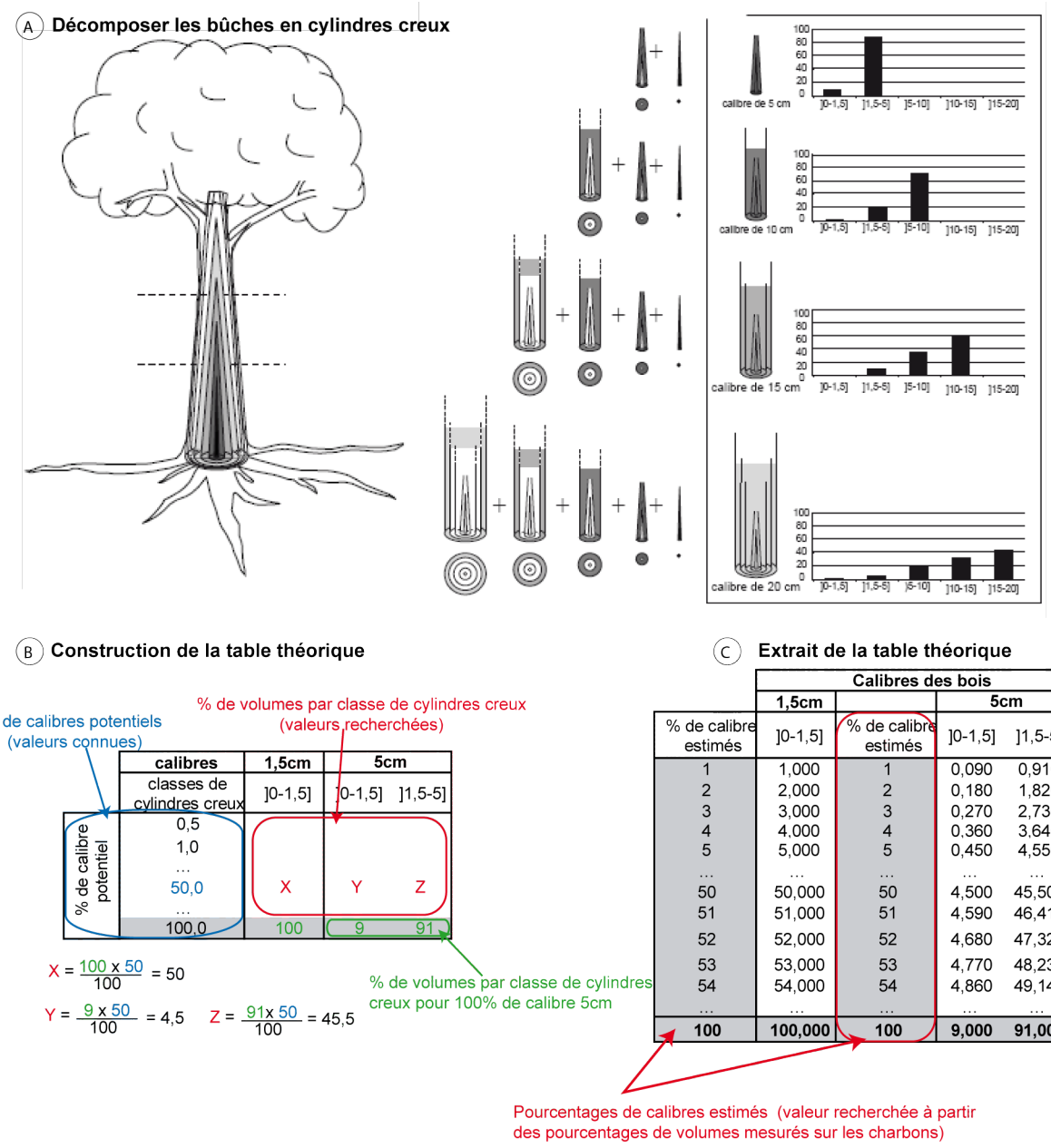


Figure 93 : Explication du principe du modèle établi par A. Dufraisse (d'après Dufraisse, 2002). A : Décomposition des bûches en classes de cylindres creux. B : Construction de la table théorique. C : Extrait de la table théorique

En comparant les proportions obtenues à l'issue de l'analyse des charbons de bois aux données de la table théorique, il est possible de mettre en évidence la présence ou non de mélanges de diamètres et ainsi de définir les proportions de chaque classe de diamètres (figure 93).

Pour employer ce modèle, nous avons préféré utiliser les classes de rayons précédemment établies, celles-ci étant plus adaptées aux mesures de rayons de courbure réalisées à l'aide du logiciel « AnthracoLoJ ». La table théorique établie par A. Dufraisse a par conséquent été modifiée. Les diamètres de référence employés pour établir les calculs sont donc pour cette étude de 2 cm, 5 cm, 10 cm, 18 cm et 30 cm (figure 94).

Voici un exemple illustrant le fonctionnement de ce modèle (figure 94). Si à l'issue de l'analyse anthracologique on retrouve les proportions suivantes : 20 % de volume dans la classe] 0-1 cm], 40 % dans la classe] 1-2,5 cm], 30 % dans la classe] 2,5-5 cm] et 10 % dans la classe]5-9 cm], il est nécessaire dans un premier temps de définir quelle est la proportion de bûches de 18 cm qui produisent 10 % de volume dans la classe] 5-9 cm]. Pour cela, on cherche dans le groupe « bûche de 18 cm de diamètre » la valeur correspondant à 10 % dans la classe] 5-9 cm]. Dans la table théorique pour 10 % de volume dans la classe] 5-9 cm], on retrouve forcément 3,4 % de volume dans la classe] 2,5-5 cm], 0,9 % dans la classe]1-2,5 cm] et 0,2 % dans la classe]0-1 cm]. Tout cela correspond à 14,5 % de bûches de diamètre 18 cm de l'assemblage des bois mis au feu. Les proportions obtenues dans les classes] 0-1 cm],] 1-2,5 cm] et] 2,5-5 cm] sont ensuite soustraites des proportions issues de l'analyse anthracologique. On procède alors de la même manière pour calculer les proportions de volume des bûches de diamètre 10 cm, 5 cm et 2 cm. Pour notre exemple, à l'issue du traitement des données par la table théorique on obtient l'assemblage suivant : 12,5 % de bûches comprises entre 0 et 2 cm de diamètre, 37,5 % de bûches comprises entre 2 et 5 cm, 35,5 % comprises entre 5 cm et 10 cm, et 14,5 % comprises entre 10 et 18 cm de diamètres.

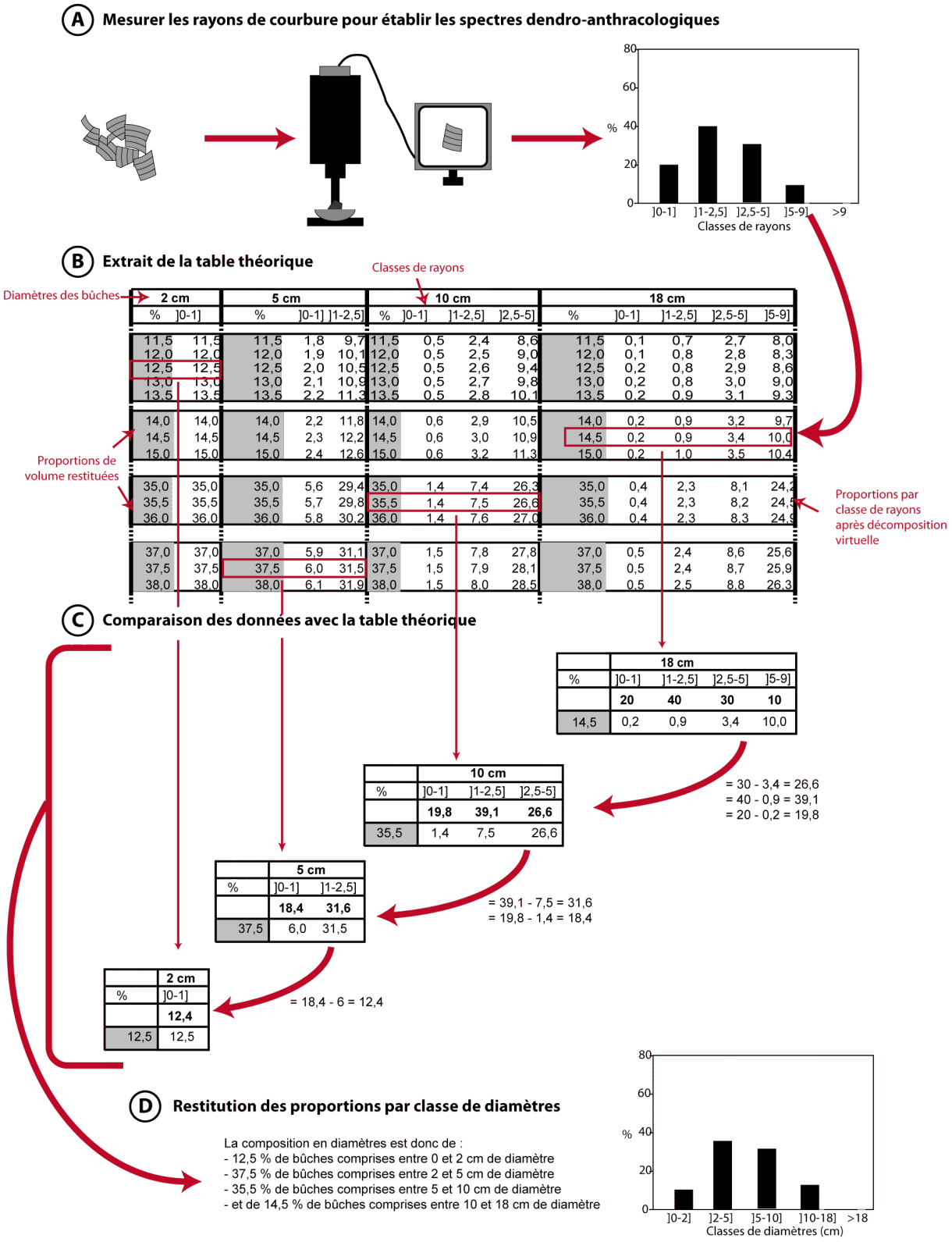


Figure 94 : Fonctionnement du modèle établi par A. Dufraisse (Dufraisse, 2002, 2006 ; Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011)

Différentes expérimentations réalisées sur des foyers ouverts ont montré que la classe périphérique était systématiquement sous représentée (Dufraisse, 2002 ; Chrzavzez, 2006 ; Paradis, 2007). Cette sous représentation a pour la plupart du temps été attribuée à la disparition des parties externes des bûches, ces parties étant réduites en cendres. Le contexte de charbonnage, qui conduit probablement à une perte au feu plus réduite que les foyers ouverts, est donc particulièrement intéressant à étudier afin d'observer si la sous représentation des classes périphériques est également visible. Nous avons donc traité, à l'aide de ce modèle, l'ensemble des résultats dendro-anthracologiques obtenus à l'issue de l'approche expérimentale de Pouligny permettant ainsi d'interpréter les spectres en proportions de diamètres de bois employés.

2.2. Application aux charbonnières expérimentales de Pouligny

En utilisant la table théorique adaptée aux classes de rayons présentées au chapitre 4, nous avons pu traiter les données obtenues à l'issue de l'analyse des charbons de bois pour les trois charbonnières expérimentales.

2.2.1. Comparer les résultats de l'analyse dendro-anthracologique aux proportions de diamètres connus avant la carbonisation

Pour chaque charbonnière nous connaissons précisément les proportions de volume par classes de diamètres avant la carbonisation. Nous pouvons donc comparer ces données avec les proportions de diamètre obtenues après traitement des données anthracologiques à l'aide de la table théorique (figure 95). Les graphiques suivants présentent en gris les proportions de diamètres connues avant la carbonisation et en rouge les proportions de volume obtenues après traitement des données de l'analyse dendro-anthracologique par le modèle. Pour calculer les proportions de diamètre nous avons réalisé trois calculs différents : en prenant en considération d'abord les résultats bruts des mesures de rayons de courbure, puis les données corrigées avec – 26 % et enfin les données corrigées avec + 26 %. Pour l'interprétation des données, ce sont les données corrigées avec les facteurs correctifs mentionnés précédemment qui ont été représentées en rouge (données brutes pour le châtaignier et + 26 % pour le hêtre et le chêne), toutefois la barre d'erreur verticale a été conservée pour représenter les proportions possibles de diamètres restitués.

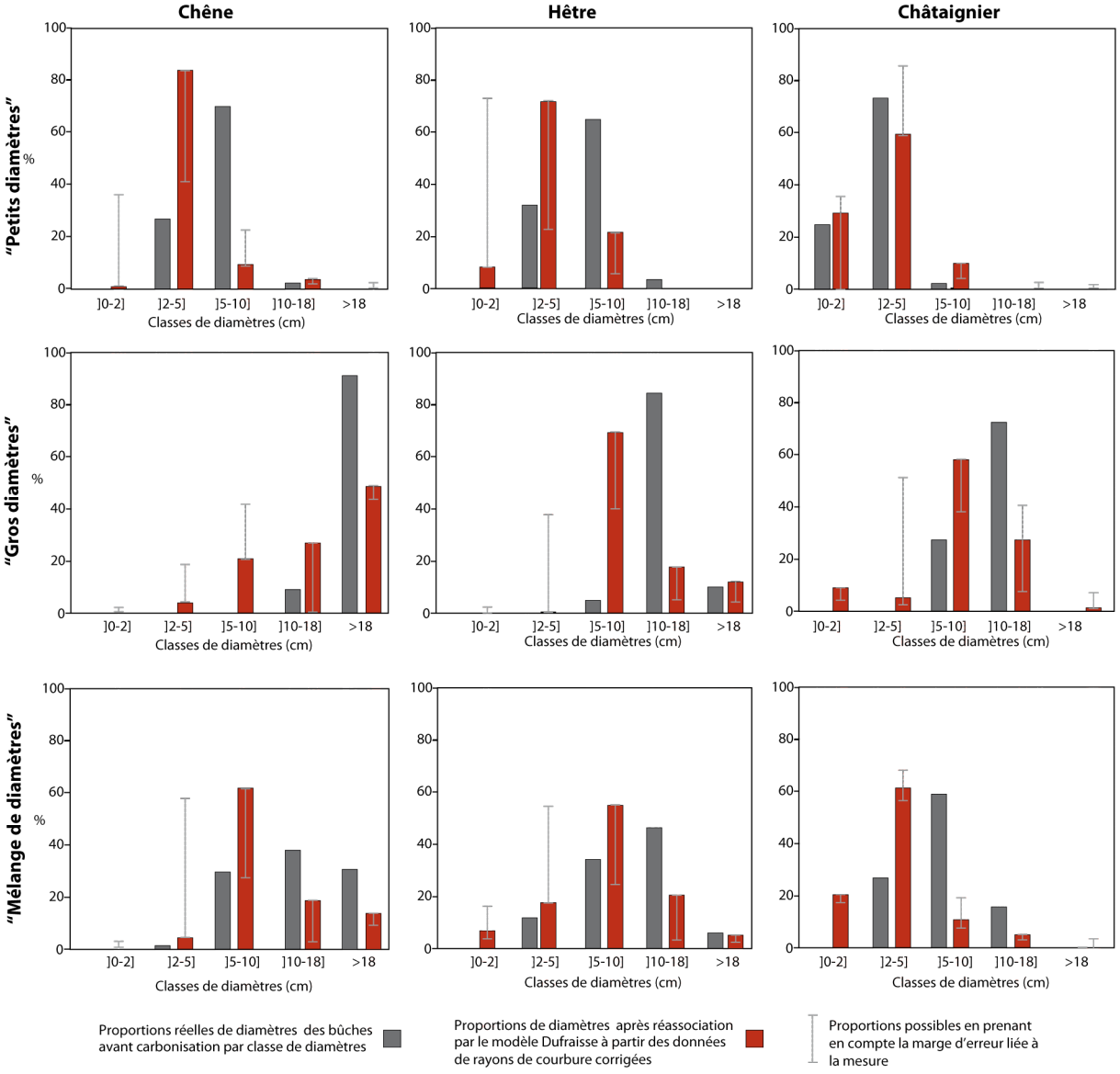


Figure 95 : Comparaison des proportions par classe de diamètres avant la carbonisation avec les résultats issus de l'analyse anthracologique et traités par le modèle établi par A. Dufraisse

A l'issue de cette analyse (figure 95), on observe de nettes différences entre les proportions calculées après traitement des données à l'aide de la table théorique et les proportions connues avant la carbonisation. Dans la majorité des cas une sous représentation dans les deux dernières classes de diamètres et une large surreprésentation des classes des plus petits diamètres est observée.

Cela est particulièrement remarquable sur la charbonnière aux petits diamètres pour le chêne et le hêtre. Avant la carbonisation, la classe] 5-10 cm] était majoritaire, avec près de 70 % du volume des bois ; or, à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique la classe

]2-5 cm] est majoritaire avec entre 50 et 80 % de l'assemblage. Si cela est particulièrement visible pour la charbonnière aux petits diamètres, on constate le même phénomène pour les deux autres charbonnières. Prenons l'exemple de la charbonnière au mélange de diamètres, pour laquelle un peu moins de 80 % du volume des bois de chêne avait un diamètre supérieur à 10 cm. Or, à la restitution du diamètre des bois par la table théorique on obtient près de 50 % de volume dans la classe]2- 5 cm]. Les résultats sont très éloignés des données connues avant la carbonisation.

A l'issue des différentes expérimentations déjà réalisées (Dufraisse, 2002 ; Chrzavzez, 2006 ; Paradis, 2007 ; Dufraisse, et Garcia-Martinez, 2011), les différences constatées ont toutes été attribuées au phénomène de perte au feu et au retrait du bois.
On comprend bien que lors de la carbonisation les cernes situés en périphérie des bûches sont plus altérés et sont parfois même réduits en cendre, empêchant ainsi de mesurer les plus grands rayons de courbure. A cette disparition de certaines parties du bois s'ajoute un autre facteur, le retrait du bois. En effet sous l'effet de l'évaporation de l'eau les tissus ligneux se rétractent, réduisant ainsi le diamètre des bûches.

Etudier le contexte de charbonnage pour évaluer le potentiel de restitution du diamètre des bois brûlés est d'autant plus intéressant pour tester la fiabilité de ce modèle. En effet, nous savons qu'au sein des charbonnières la perte au feu est relativement réduite, les écorces sont souvent encore présentes sur les bûches totalement carbonisées. La sous représentation des classes de plus grands diamètres ne peut donc pas s'expliquer ici par la réduction en cendre d'une partie des bois.

Le retrait du bois peut alors influencer les mesures mais nous l'avons vu précédemment en corrigeant les données on s'approche assez bien des proportions de volume par classes de rayons connues avant la carbonisation. Ce décalage peut alors s'expliquer par l'emploi d'une table théorique utilisant des classes de diamètres aux bornes fixes.

2.2.2. Des écarts expliqués par l'utilisation de la table théorique

A l'issue de cette analyse nous avons cherché à identifier si cette sous représentation était véritablement liée aux processus de carbonisation, qui indéniablement influencent l'étude du diamètre des bois, ou bien si celle-ci peut s'expliquer par d'autres facteurs, comme l'utilisation d'un modèle mathématique.

Il semblerait que l'utilisation d'un modèle théorique, dont les bornes des classes de diamètres sont fixes peut également induire un biais à la restitution du diamètre des bois. Pour vérifier cette hypothèse, nous avons alors testé la capacité du modèle à restituer le diamètre des bois à partir des données connues avant la carbonisation, c'est à dire en utilisant les proportions de volumes calculées par classe de cylindres creux après la « décomposition » virtuelle de l'ensemble des bûches placées dans les meules.

Les résultats montrent des différences entre les proportions du diamètre des bois connues avant la carbonisation, et les proportions de diamètre obtenues après réassociation des cylindres creux par la table théorique (figure 96).

Malgré la « réassociation » de proportions de volume sur les données théoriques, nous n'obtenons pas les valeurs de proportions connues avant la carbonisation. On retrouve également une sous représentation des proportions de volume dans les classes de plus grands diamètres et une surreprésentation dans les classes de plus petits diamètres. Il est assez surprenant de constater de tels écarts sur les données théoriques.

Les différences les plus marquées se situent sur les classes de plus gros diamètres. Cela s'explique assez facilement. En effet, les proportions de volume calculées dans la table sont valables pour les diamètres correspondant aux bornes supérieures des classes. Or, les bois mis dans les meules n'ont pas des diamètres correspondant aux bornes de nos classes.

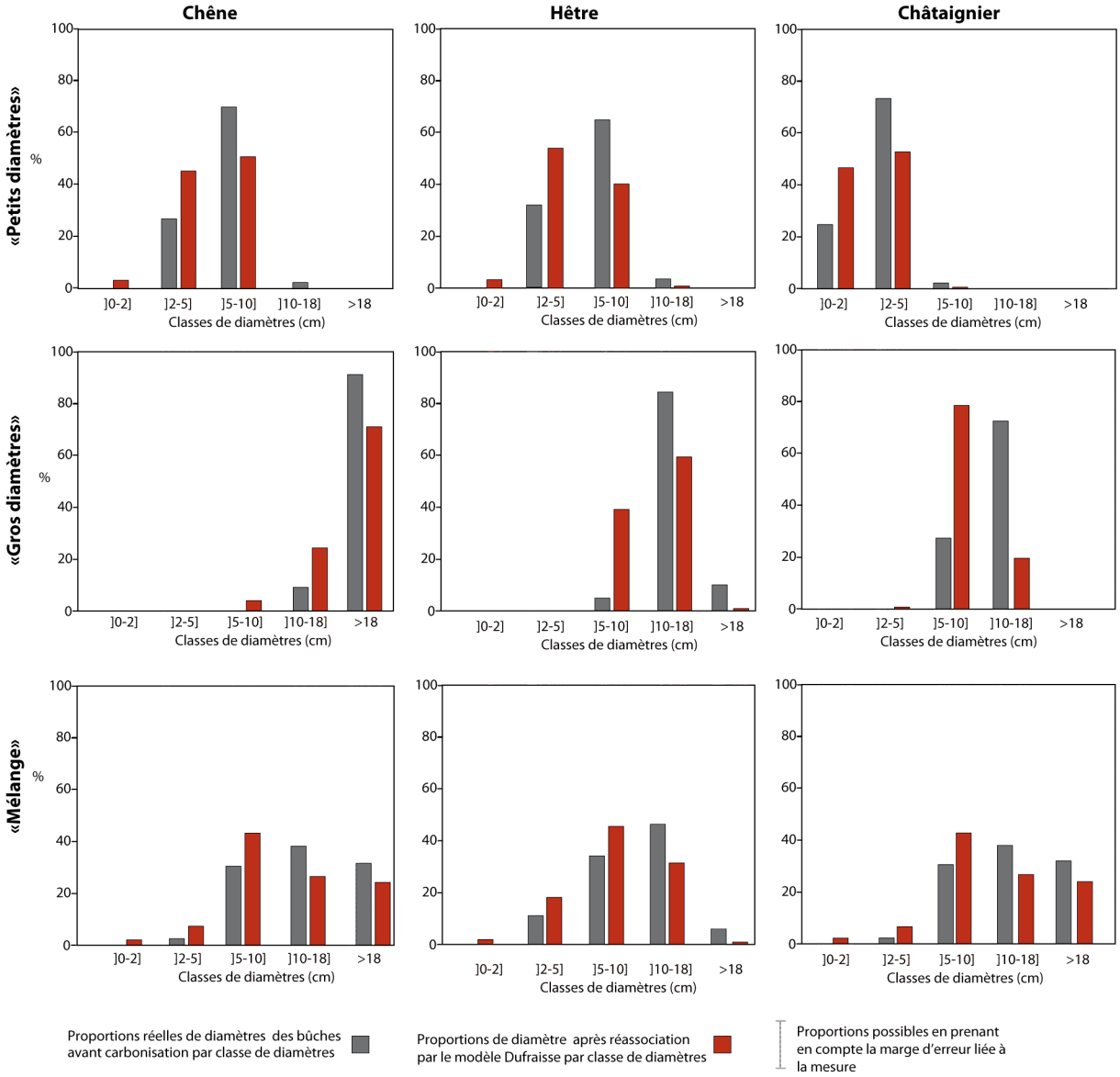


Figure 96 : Comparaison des proportions connues par classe de diamètres avant la carbonisation avec les diamètres restitués après traitement par le modèle « Dufraisse » des proportions de volume par classe de rayons calculées à partir de la « décomposition » virtuelle des bûches

Dans tous modèles théoriques, travailler sur des bornes fixes présente des inconvénients. Dans leurs derniers travaux A. Dufraisse et M.S. Garcia-Martinez mettent en avant la nécessité de relativiser l'information obtenue à l'issue du traitement des données par la table théorique, considérant la table comme une aide à l'interprétation sans prendre directement les résultats obtenus (Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011). Les auteurs précisent qu'il est nécessaire de poursuivre les recherches pour affiner les protocoles de restitution du diamètre des bois brûlés.

L'expérimentation réalisée dans le cadre de cette étude a permis de comparer différentes méthodes pour restituer les diamètres de bois charbonnés. Ces résultats montrent combien la restitution du diamètre des bois est une étape délicate pour laquelle il est encore nécessaire de travailler afin d'adapter les modèles mathématiques aux corpus dendro-anthracologiques. Dans le cadre de cette étude, nous proposons de poursuivre cette réflexion, et d'aboutir à une nouvelle approche pour aborder la question de la restitution du diamètre des bois brûlés.

3. Retrouver le diamètre des bois charbonnés à partir d'une démarche comparative

Dans le chapitre 4, il a été démontré que dans l'ensemble les proportions de volume par classe de rayons sont proches des proportions connues avant la carbonisation, à condition de corriger les rayons de courbure avec les facteurs correctifs adaptés à chaque essence. Si les histogrammes correspondent aux données connues avant la carbonisation, la restitution du diamètre des bois doit être réalisable sans générer d'importantes déformations. Pourtant les deux modèles précédents ne permettent pas d'accéder à une image proche des données connues avant la carbonisation. C'est donc une nouvelle approche, basée sur une démarche inductive qui est développée dans le cadre de ce travail.

Celle-ci est basée sur une étude comparative des proportions de volume par classe de rayons obtenues à l'issue de l'analyse des charbons de bois à des histogrammes de référence pour lesquels on connaît parfaitement la composition en diamètres. Cela correspond finalement à combiner les deux précédents modèles ; celui de O. Nelle et de T. Ludemann qui consiste à comparer des données dendro-anthracologiques à des histogrammes de référence élaborés sur des charbonnières contemporaines et celui de A. Dufraisse qui utilise un modèle mathématique pour calculer de façon théorique les proportions obtenues à l'issue de la « décomposition » virtuelle.

L'élaboration de cette nouvelle approche nécessite deux étapes. La première consiste à construire des simulations servant de références lors de l'analyse comparative. La seconde étape est une phase de validation de l'approche ; en utilisant les données des trois charbonnières expérimentales de Pouligny nous pouvons évaluer si la restitution du diamètre des bois correspond aux données connues avant la carbonisation.

3.1. Construire les simulations de référence

3.1.1. Le choix des diamètres théoriques

Afin de permettre une analyse comparative la plus fine possible nous avons cherché à représenter un nombre important d'associations de diamètres. Pour cela nous nous sommes appuyés sur les classes de diamètres précédemment présentées. Pour rappel, cinq classes ont été définies : les « très petits bois » correspondent à des diamètres compris entre 0 et 2 cm, les « petits bois » sont compris entre 2 et 5 cm de diamètre, les « bois moyens » entre 5 et 10 cm, les « gros bois » entre 10 et 18 cm et enfin les « très gros bois » présentent des diamètres supérieurs à 18 cm.

Pour calculer les proportions par classe de rayons des différentes simulations, nous avons choisi, pour chaque classe de diamètres, une à trois valeurs de diamètres de bois. Pour représenter les « très petits bois » ce sont des diamètres de 1 cm qui sont employés, pour les « petits bois » les calculs sont réalisés sur un diamètre de 3 cm. Par contre pour les classes de plus grandes amplitudes nous avons choisi de travailler sur différentes taille de bois. Les « bois moyens » sont représentés par des diamètres de 6 et 8 cm, les « gros bois » par des diamètres de 11, 14 et 17 cm et enfin pour les « très gros bois » ce sont des diamètres de 20, 25 et 30 cm qui sont retenus. Lors des calculs, les bois d'un diamètre supérieur à 30 cm n'ont pas été pris en compte, ces derniers semblent peu propices à la construction des meules et souvent privilégiés pour le bois d'œuvre.

Lors de la construction des assemblages nous avons procédé de manière théorique afin d'obtenir un éventail le plus large possible d'associations des différentes gammes de diamètres et cela dans des proportions différentes.
Pour cela nous avons procédé de la façon suivante, en calculant les proportions par classe de rayons :

- d'abord pour une seule catégorie de diamètres, en prenant par exemple 100 % de bûches au diamètre compris entre 0 et 2 cm, c'est-à-dire des « très petits bois »
- puis en mélangeant deux catégories de diamètres, par exemple des bûches de 0 à 2 cm de diamètre, « très petits bois », avec des bûches mesurant 5 à 10 cm de diamètre, « bois moyens »

- puis en mélangeant trois catégories
- et enfin en mélangeant toutes les catégories.

Numéro simulation	Description de l'assemblage	Proportions par classes de diamètres				
		[0-2 cm]	[2-5 cm]	[5-10 cm]	[10-18 cm]	>18 cm
1	Très petits bois seulement (0-2 cm diamètre)	100				
2	Petits bois seulement (2-5 cm diamètre)		100			
3	Bois moyens seulement (5-10 cm diamètre)			100		
4	Gros bois seulement (10-18 cm diamètre)				100	
5	Très gros bois seulement (supérieurs à 18 cm)					100
6	Très petits bois et petits bois à parts égales	50	50			
7	Très petits bois et petits bois, très petits bois majoritaires	70	30			
8	Très petits bois et petits bois, petits bois majoritaires	30	70			
9	Très petits bois et bois moyens à parts égales	50		50		
10	Très petits bois et bois moyens, très petits bois majoritaires	70		30		
11	Très petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires	30		70		
12	Très petits bois et gros bois à parts égales	50			50	
13	Très petits bois et gros bois, très petits bois majoritaires	70			30	
14	Très petits bois et gros bois, gros bois majoritaires	30			70	
15	Très petits bois et très gros bois à parts égales	50				50
16	Très petits bois et très gros bois, très petits bois majoritaires	70				30
17	Très petits bois et très gros bois, très gros bois majoritaires	30				70
18	Petits bois et bois moyens à parts égales		50	50		
19	Petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires		70	30		
20	Petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires		30	70		
21	Petits bois et gros bois à parts égales		50		50	
22	Petits bois et gros bois, petits bois majoritaires		70		30	
23	Petits bois et gros bois, gros bois majoritaires		30		70	
24	Petits bois et très gros bois à parts égales		50			50
25	Petits bois et très gros bois, petits bois majoritaires		70			30
26	Petits bois et très gros bois , très gros bois majoritaires		30			70
27	Bois moyens et gros bois à parts égales			50	50	
28	Bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires			70	30	
29	Bois moyens et gros bois, gros bois majoritaires			30	70	
30	Bois moyens et très gros bois à parts égales			50		50
31	Bois moyens et très gros bois, bois moyens majoritiaires			70		30
32	Bois moyens et très gros bois, très gros bois majoritaires			30		70
33	Gros bois et très gros bois à parts égales				50	50
34	Gros bois et très gros bois, gros bois majoritiaires				70	30
35	Gros bois et très gros bois, très gros bois majoritiaires				30	70
36	Très petits bois, petits bois et bois moyens à parts égales	33,3	33,3	33,3		
37	Très petits bois, petits bois et bois moyens, très petits bois majoritaires	70	15	15		
38	Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires	15	70	15		
39	Très petits bois, petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires	15	15	70		
40	Très petits bois, bois moyens et gros bois à parts égales	33,3		33,3	33,3	
41	Très petits bois, bois moyens et gros bois, très petits bois majoritaires	70		15	15	
42	Très petits bois, bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires	15		70	15	
43	Très petits bois, bois moyens et gros bois, gros bois majoritaires	15		15	70	
44	Très petits bois, gros bois et très gros bois à parts égales	33,3			33,3	33,3
45	Très petits bois, gros bois et très gros bois, très petits bois majorititaires	70			15	15
46	Très petits bois, gros bois et très gros bois, gros bois majoritaires	15			70	15
47	Très petits bois, gros bois et très gros bois, très gros bois majoritaires	15			15	70
48	Petits bois, bois moyens et gros bois à parts égales		33,3	33,3	33,3	
49	Petits bois, bois moyens et gros bois, petits bois majoritaires		70	15	15	
50	Petits bois, bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires		15	70	15	
51	Petits bois, bois moyens et gros bois, gros bois majoritaires		15	15	70	
52	Bois moyens, gros bois et très gros bois à parts égales			33,3	33,3	33,3
53	Bois moyens, gros bois et très gros bois, bois moyens majoritaires			70	15	15
54	Bois moyens, gros bois et très gros bois, gros bois majoritaires			15	70	15
55	Bois moyens, gros bois et très gros bois, très gros bois majoritaires			15	15	70
56	Tous à parts égales	20	20	20	20	20
57	Tous, très petits bois majoritaires	70	7,5	7,5	7,5	7,5
58	Tous, petits bois majoirtaires	7,5	70	7,5	7,5	7,5
59	Tous, bois moyens majoritaires	7,5	7,5	70	7,5	7,5
60	Tous, gros bois majoritaires	7,5	7,5	7,5	70	7,5
61	Tous, très gros bois majoritaires	7,5	7,5	7,5	7,5	70

Figure 97 : Présentation des soixante et une simulations

Afin d'obtenir des assemblages variés, les calculs ont été réalisés en prenant en considération d'abord des proportions équivalentes entre les différents groupes, puis tour à tour chaque classe de diamètres a été considérée comme majoritaire ; c'est à dire avec 70 % des proportions de diamètres, dans ce cas les 30 % restant ont été répartis de manière équitable entre les autres classes.

A partir de ces combinaisons 61 simulations ont été créées (figure 97)

3.1.2. Etablir les simulations en fonction du nombre de bûches

Lors de l'établissement des histogrammes de référence, deux possibilités s'offraient à nous. En effet, lorsque l'on évoque des proportions de diamètre équivalentes entre deux catégories de bois, il est possible de calculer les proportions soit en prenant en considération des volumes équivalents, soit en prenant en compte un nombre de bûche équivalent. Prenons un exemple (figure 98) : un mélange à parts égales entre des bûches de 2 cm de diamètre et des bûches de 18 cm. Le terme à parts égales peut être représenté par des volumes équivalents de l'ensemble des bûches, auquel cas il faudrait 81 bûches de 2 cm pour obtenir le même volume qu'une seule bûche de 18 cm de diamètre (figure 98 A). En revanche, si l'on considère la répartition en nombre de bûches, alors il faut 10 bûches de 2 cm et 10 bûches de 18 cm (figure 98 B). Dans ce cas les volumes des deux tas de bois sont alors radicalement différents, et le spectre issu de la « décomposition » virtuelle en classe de rayons l'est également. La différence est encore plus marquée lorsque l'on choisit de mettre en majorité des bûches de 2 cm. En effet, le nombre de bûches de 2 cm sera encore plus important dans les deux cas ; en revanche, le volume du tas de bois pour les proportions établies en fonction du nombre restera plus petit que le tas de bois de bûches de 18 cm de diamètre.

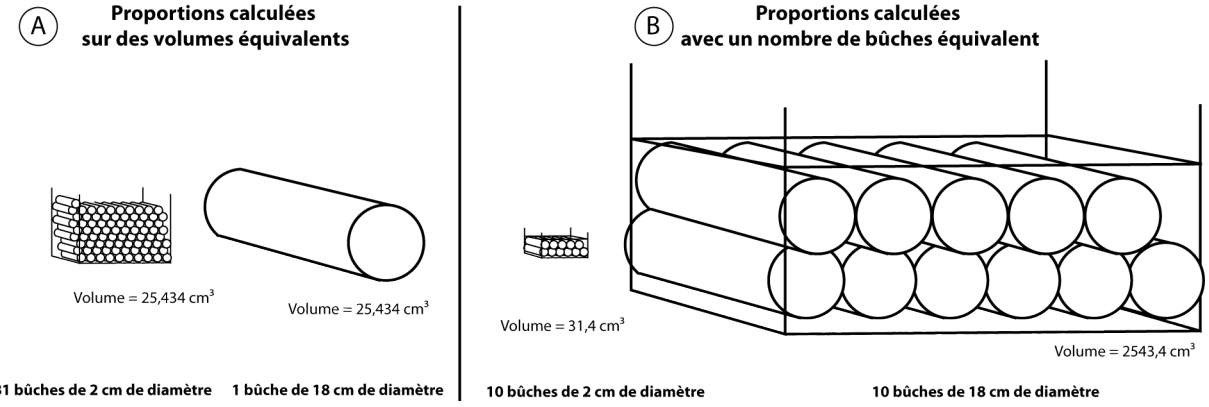


Figure 98 : Représenter les proportions de diamètre par classe, en fonction du nombre de bûches ou en fonction du volume

On peut alors se poser la question de l'emploi du terme majoritaire. Doit-on l'employer lorsque les volumes sont majoritaires ou bien lorsque le nombre de bûches est majoritaire ?

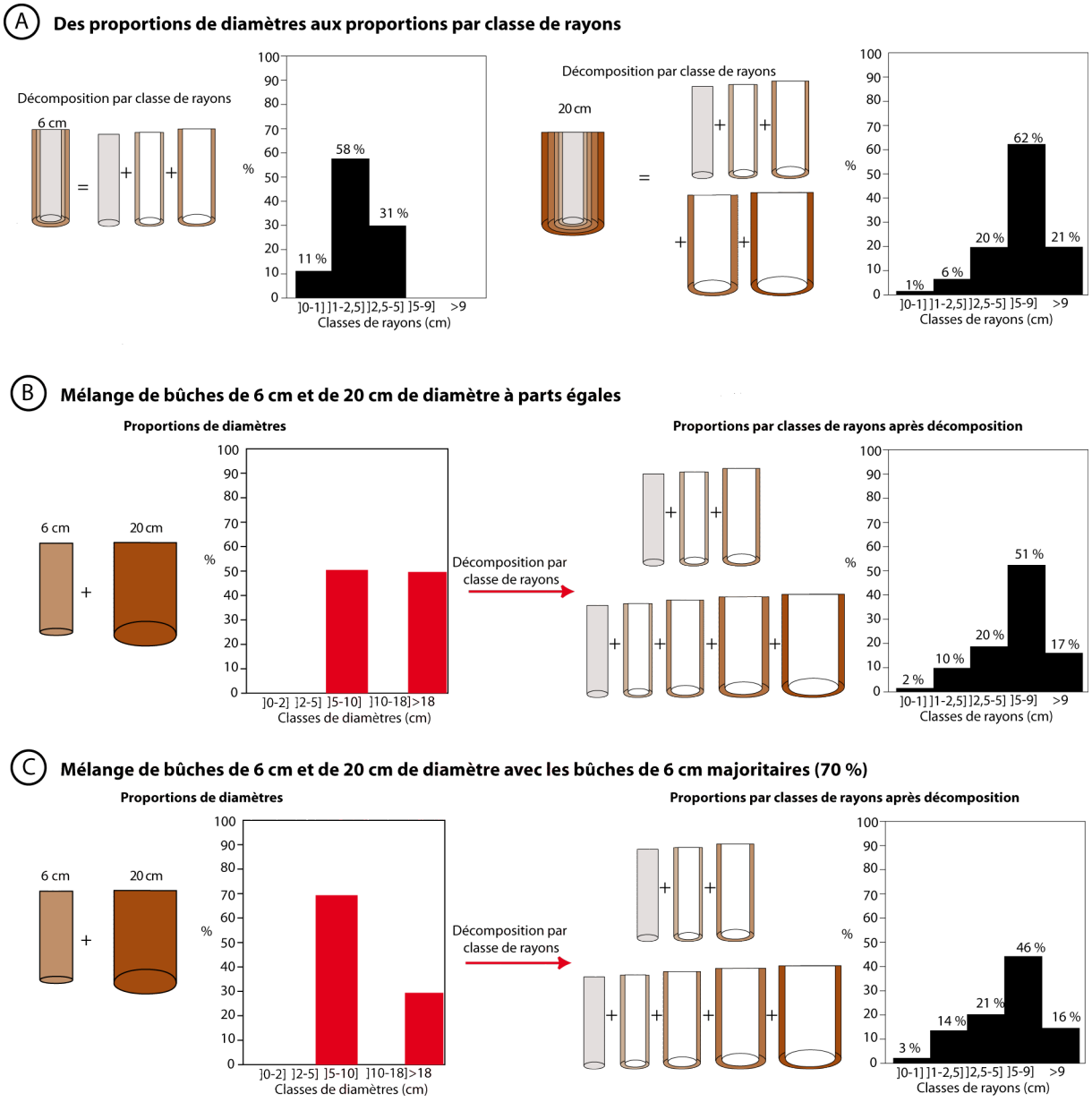


Figure 99 : Exemple de calculs pour construire les spectres théoriques

Dans le cadre de cette étude nous avons choisi de représenter les proportions de diamètres en prenant en compte le nombre de bûches, car cela nous semble plus évocateur pour traiter de la gestion du bois de feu et notamment du bois pour la construction des meules. De plus, l'utilisation du nombre de bûches est plus simple à employer pour construire les spectres de référence. En effet, considérant un mélange de 100 bûches, il suffit alors de les répartir en fonction des proportions choisies pour chaque classe de diamètres. En revanche pour créer les simulations théoriques en fonction des volumes, il est nécessaire

dans un premier temps de calculer le volume total de l'assemblage puis de le répartir selon les proportions choisies, les calculs sont alors beaucoup plus fastidieux.

Pour mieux appréhender la construction de ces spectres de référence nous proposons ici un exemple (figure 99). Si l'on mélange à parts égales des bûches de 6 cm et des bûches de 20 cm on obtient alors un spectre finalement assez similaire au spectre issu de la « décomposition » des bûches de 20 cm de diamètre. En effet, en proportion de nombre, la part de volume apportée par les bûches de 20 cm devient majoritaire par rapport aux bois de petits diamètres. En revanche, si l'on calcule le spectre théorique en considérant les bûches de 6 cm comme majoritaires, on observe des changements, avec notamment une augmentation des proportions dans les classes de petits rayons et une diminution dans les classes de plus grands rayons. La morphologie de l'histogramme reste la même mais les proportions par classe de rayons varient légèrement, il faut donc y être particulièrement attentif.

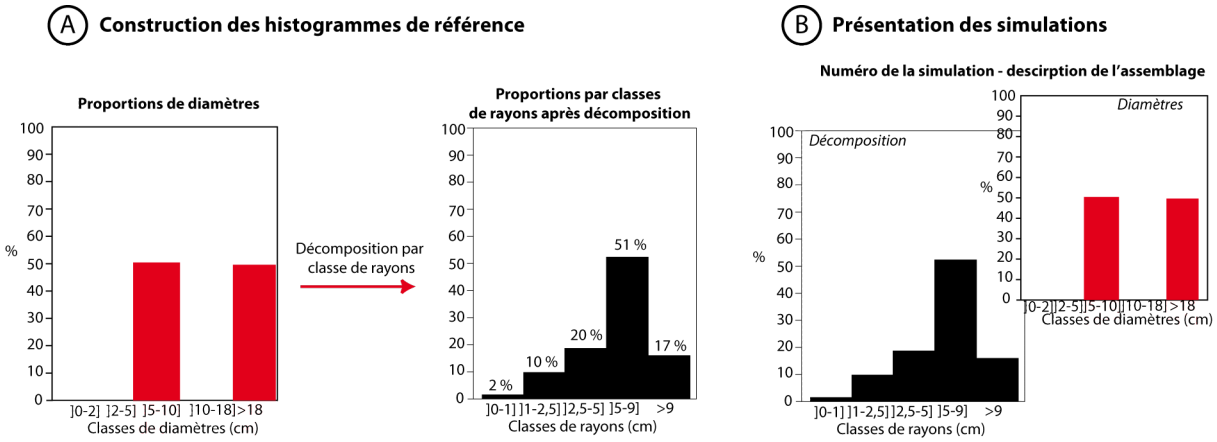


Figure 100 : Explication de la présentation des 61 simulations pour développer la démarche inductive

Chaque simulation réalisée est représentée de la manière suivante pour simplifier l'approche comparative : l'histogramme en noir correspond aux proportions par classe de rayons issues de la « décomposition » virtuelle et l'histogramme rouge indique la composition en diamètres de l'assemblage (figure 100).

3.1.3. Soixante et une simulations réparties en quatre groupes.

Sur les soixante et une simulations créées, certaines présentent des profils d'histogrammes relativement proches. On peut ainsi chercher à les associer au sein de différents groupes pour ensuite simplifier l'analyse comparative avec les données dendro-anthracologiques. Pour identifier ces groupes nous avons utilisé une Classification Ascendante Hiérarchique. Celle-ci consiste à associer les simulations les plus proches au sein de groupes, pour cela le coefficient de Pearson a été employé. La Classification Ascendante Hiérarchique propose ici quatre groupes bien distincts (figure 101). Les numéros indiqués en bas du dendrogramme représentent ainsi chaque simulation.

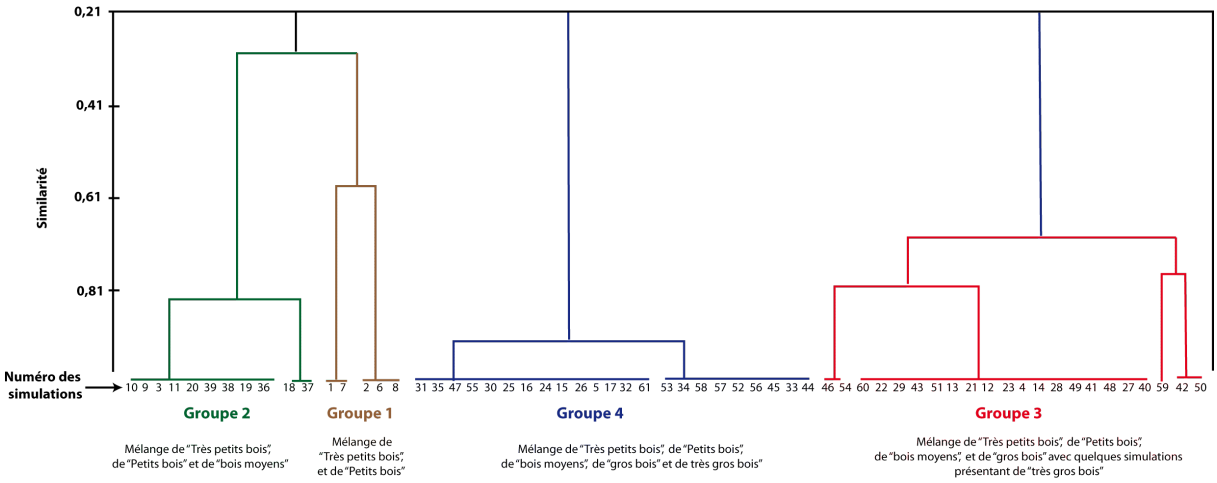


Figure 101 : Classification Ascendante Hiérarchique obtenue pour l'ensemble des simulations et définition des six groupes

Le groupe 1 correspond à des histogrammes présentant des données uniquement dans les deux premières classes de rayons, ce qui correspond à une association de « très petits bois » et de « petits bois ». Le groupe 2 quant à lui associe des histogrammes présentant des proportions de volume dans les trois premières classes, ce qui correspond à un ajout de « bois moyens » par rapport aux assemblages du groupe 1. Le groupe 3 associe à la fois des histogrammes présentant des données dans quatre ou cinq classes de rayons, avec plusieurs profils d'histogrammes. Quant au groupe 4, l'ensemble des simulations présente des données dans les cinq classes de rayons mais les profils d'histogrammes varient de façon importante.

L'approche comparative consiste à retrouver la ou les simulations s'approchant le plus des histogrammes obtenus par l'analyse dendro-anthracologique. Pour simplifier les recherches, l'ensemble des simulations a été organisé suivant les quatre groupes présentés. Puis, au sein de chaque groupe, les histogrammes présentant des profils très similaires (croissant, décroissant, en cloche etc.) ont été assemblés au sein de sous-groupes. Il est ainsi plus aisé de rechercher la simulation s'approchant le plus des données archéologiques (annexes 8, 9, 10, 11).

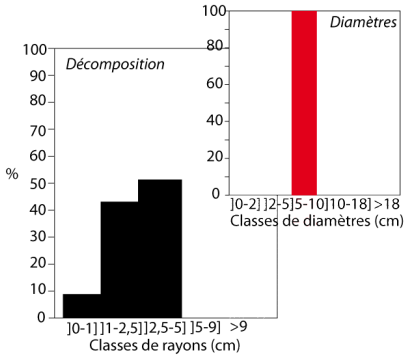
Prenons l'exemple du groupe 2, sur les 11 simulations associées on observe des profils d'histogrammes très différents : croissant, décroissant ou encore présentant un profil en cloche (figure 102).

Sur les 11 simulations du groupe 2, 6 histogrammes présentent des profils croissants (simulation 3, 9, 10, 11, 20 et 39), avec de plus fortes proportions dans la classe]2,5-5 cm]. On peut toutefois dissocier les simulations 9 et 10 car elles présentent des proportions plus importantes dans la classe de rayons]0-1 cm], celles-ci sont supérieures à 15 %, alors que les quatre autres simulations présentent moins de 10 % de volume dans cette classe. Cette différence de proportions au niveau des classes de petits rayons est primordiale à prendre en considération, car elle permet d'identifier l'utilisation en plus grande quantité de bois de petits diamètres ; cela est particulièrement visible entre les simulations 10 et 11 qui présentent les mêmes classes de diamètre dans l'assemblage mais les proportions sont différentes. La dominance de très petit bois dans la simulation 10 se traduit par de plus fortes proportions de volume dans la classe de rayons]0-1 cm]. A partir de ces observations nous avons alors formé deux sous groupes, le sous-groupe 2a qui correspond aux simulations 3, 11, 20 et 39, et le sous-groupe 2b qui contient les simulations 10 et 11.

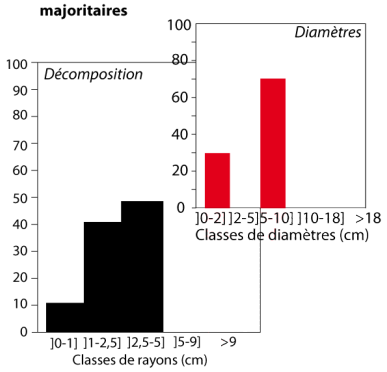
Groupe 2 : trois classes de rayons représentées

Groupe 2 a : Profils croissants avec un écart important entre les classes]0-1 cm] et]1-2,5 cm]

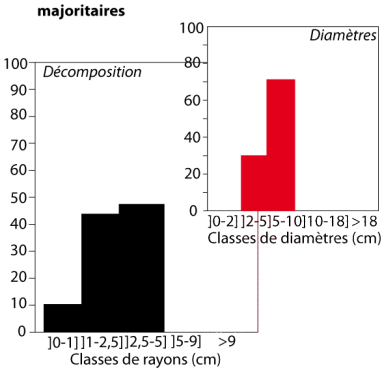
3 - Bois moyens seulement



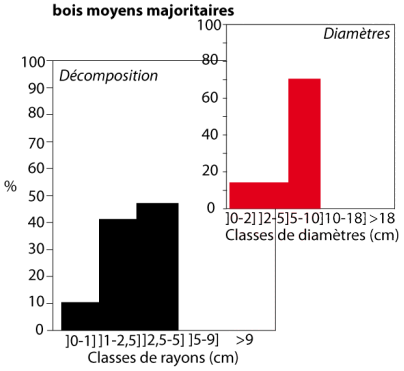
11 - Très petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires



20 - Petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires

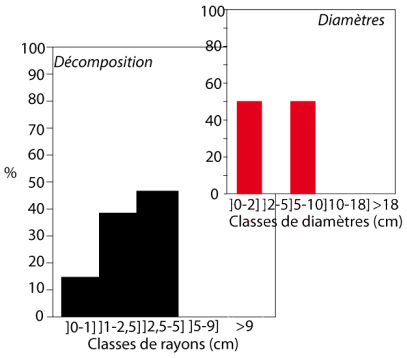


39 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires

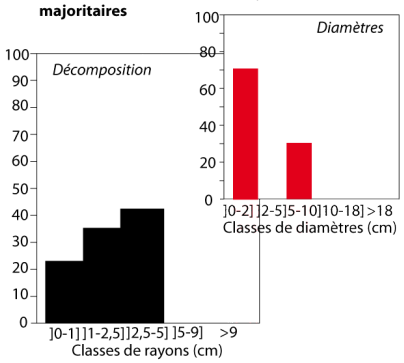


Groupe 2 b : Profils croissants avec un écart plus réduit entre les classes]0-1 cm] et]1-2,5 cm]

9 - Très petits bois et bois moyens à parts égales

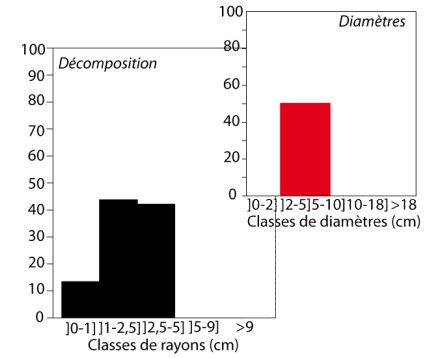


10 - Très petits bois et bois moyens, très petits bois majoritaires

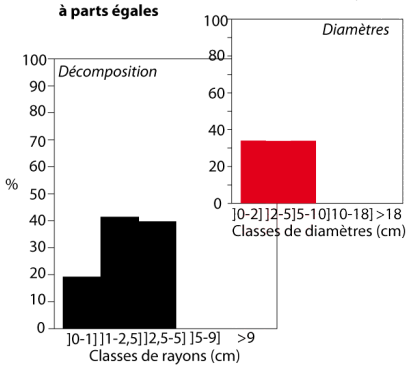


Groupe 2 c : Profils croissants avec très peu de différences entre les classes]1-2,5 cm] et]2,5-5 cm]

18 - Petits bois et bois moyens à part égales



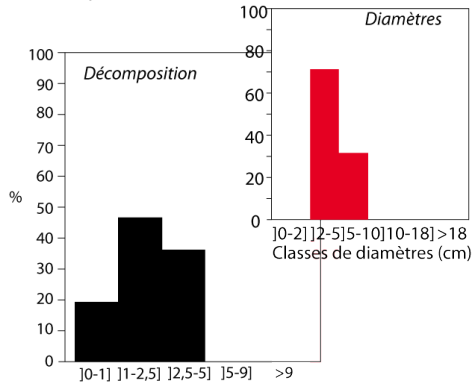
36 -Très petits bois, petits bois et bois moyens à parts égales



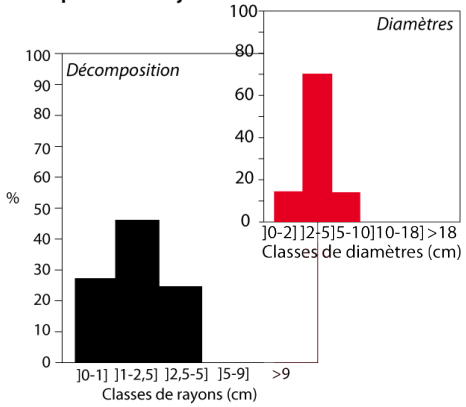
Groupe 2 : trois classes de rayons représentées (suite)

Groupe 2 d : Profils en cloche

19 - Petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires



38 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires



Groupe 2 e : Proportions quasiment équivalentes entre les trois classes

37 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, très petits bois majoritaires

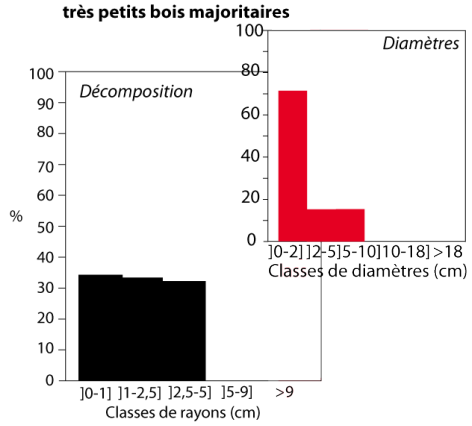


Figure 102 : Groupe 2 des histogrammes de référence

Trois autres sous-groupes sont également identifiables. Le sous-groupe 2c présente des profils croissants (simulation 18 et 36), mais les classes de rayons]1-2,5 cm],]2,5-5 cm] sont quasiment identiques. Ces histogrammes correspondent à un mélange à parts égales de deux ou trois premières catégories de diamètres.

Le sous-groupe 2d quant à lui présente des profils parfaitement en cloche ; on peut seulement observer une inversion dans les proportions entre les classes]0-1 cm] et]2,5-5 cm], cela témoigne d'une utilisation en plus ou moins grande quantité de « bois moyens ».

Enfin le sous-groupe 2e ne correspond qu'à une seule simulation, mais celle-ci est très différente des autres. Le profil est relativement stable avec une légère diminution des proportions vers les classes de plus grands rayons. Cela correspond à un mélange des trois premières catégories de diamètres mais avec une majorité de « très petits bois ».

A travers cet exemple on constate que chaque simulation est un cas individuel d'assemblage de diamètres, il est donc nécessaire de les étudier attentivement pour choisir la simulation s'approchant le plus des données archéologiques.

Il faut tout de même remarquer que dans certaines situations les simulations sont difficilement différentiables. En effet, malgré des assemblages de diamètres différents, une fois la « décomposition » virtuelle appliquée les proportions par classe de rayons sont quasiment identiques. Cela est particulièrement visible dans le groupe 4 pour les simulations 5, 15 et 16 (figure 103). Le profil d'histogramme obtenu pour l'utilisation uniquement de « très gros bois » (simulation 5) est très similaire aux données obtenues pour un mélange de « très gros bois » et de « très petits bois » (simulation 16 et 17). En effet la présence de « très gros bois » masque complètement la présence de « très petits bois ». Le volume apporté par les classes de grands rayons est largement dominant. Même avec de fortes proportions de « très petits bois » le profil ne diffère pas d'une utilisation de « très gros bois » uniquement (c'est le cas de la simulation 16). Il est important de prendre conscience de ce biais pour interpréter au mieux les résultats des analyses conduites sur les plateformes de charbonnage.

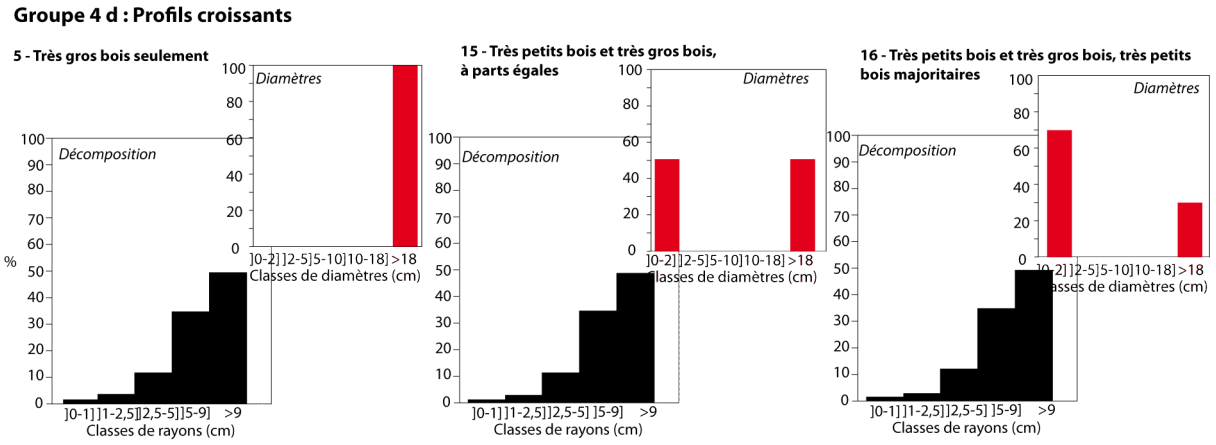


Figure 103 : Exemple de simulations difficilement différenciables (simulation 5, 15 et 16)

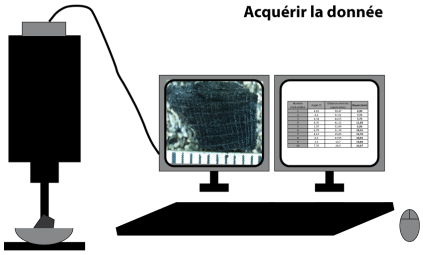
3.1.4. Procédure pour conduire la démarche comparative.

A partir de ces soixante et une simulations nous pouvons désormais développer l'approche comparative qui consiste à comparer les données dendro-anthracologiques aux histogrammes de référence. Il est donc nécessaire de construire convenablement les histogrammes à partir des données acquises lors de l'analyse des charbons de bois. Pour cela il est impératif de calculer les proportions de volume par classe de rayons en prenant en considération les rayons de courbure corrigés avec les facteurs correctifs adaptés à chaque essence. C'est uniquement à partir de ces données que la démarche comparative peut être réalisée (figure 104 A).

Bien que l'ensemble des simulations soit désormais trié par groupes et organisé en sous-groupes pour simplifier la comparaison avec les données issues de l'analyse des charbons de bois, la comparaison une à une des simulations peut s'avérer fastidieuse. Dans le cadre de cette recherche nous proposons d'utiliser une Analyse Factorielle Discriminante. Celle-ci associe les spectres dendro-anthracologiques aux simulations regroupées au sein de quatre groupes mettant en évidence la ou les simulations s'approchant le plus des données archéologiques. A partir de cette première analyse nous pouvons ensuite comparer visuellement les histogrammes des simulations aux histogrammes obtenus à l'issue de l'analyse des charbons de bois (figure 104 B).

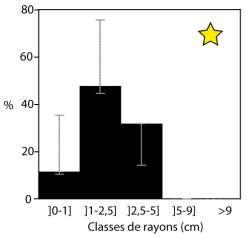
A Construire les spectres dendro-anthracologiques

Acquérir la donnée



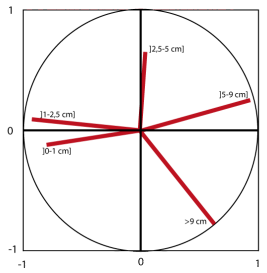
Numéro d'échantillon	Angle (°)	Distance entre les rayons (mm)	Rayon (mm)
1	4,61	38,47	**6,99**
2	4,2	31,51	**7,74**
3	4,34	44,55	**5,73**
4	8,35	41,32	**11,83**
5	3,93	32,68	**6,99**
6	6,78	21,34	**18,31**
7	4,13	15,05	**15,75**
8	6,3	33,55	**10,91**
9	3,3	13,7	**13,83**
10	7,76	26,9	**16,67**

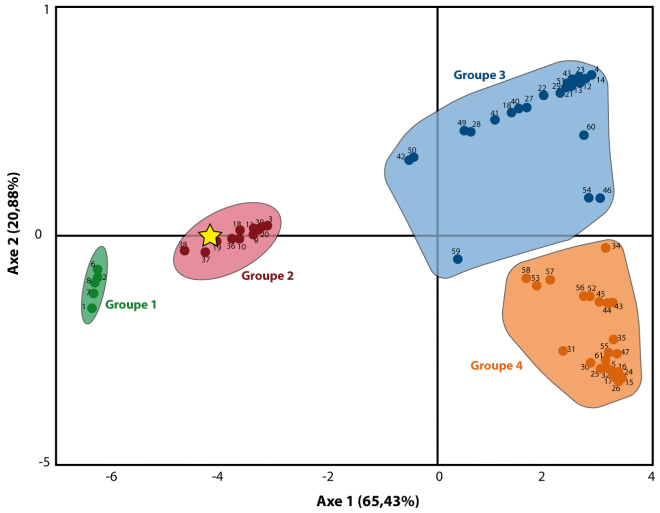
Construire les spectres en prenant en considération la correction



B Comparer les spectres dendro-anthracologiques aux soixante et une simulations

1 - Comparaison statistique : l ' Analyse Factorielle Discriminante permet d'associer les données archéologiques au groupe de simulations le plus proche



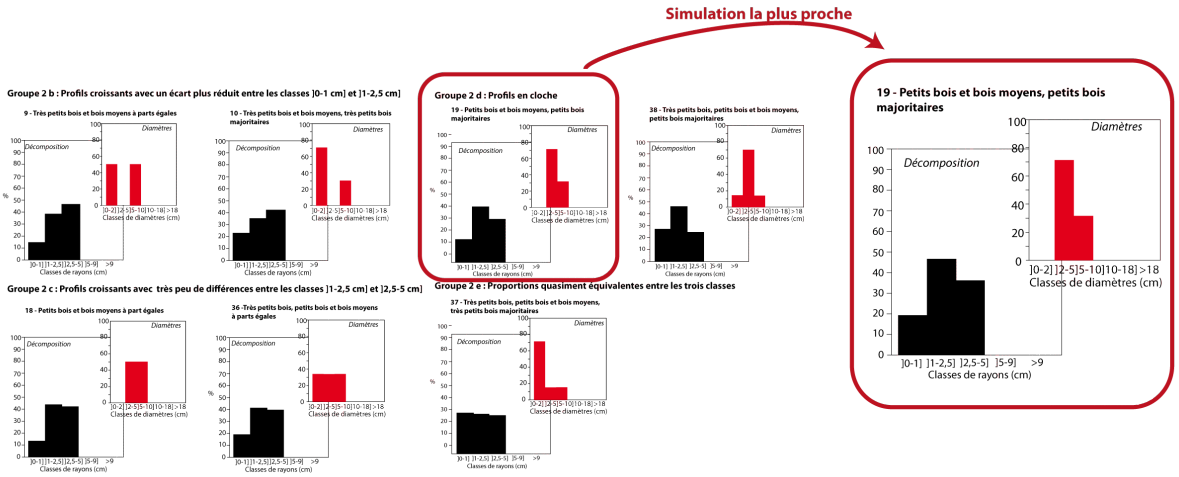


Simulations des :
- Groupe 1
- Groupe 2
- Groupe 3
- Groupe 4

Histogrammes issue de l'analyse dendro-anthracologiques

Limites des groupes

2 -Comparaison visuelle : Parmi l'ensemble des simulations du groupe 2, la simulation 19 est la plus similaire



On peut alors interpréter cet assemblage comme un mélange de "petits bois" et de "bois moyens" avec une majorité de "petits bois"

Figure 104 : Explication de la procédure à suivre pour conduire la démarche comparative

3.2. Validation de la démarche comparative à travers l'approche expérimentale

Avant d'appliquer cette nouvelle approche, nous l'avons d'abord validée à partir des données des charbonnières expérimentales de Pouligny. La parfaite connaissance du diamètre des bois mis dans les charbonnières permet de comparer les interprétations faites à partir de la démarche comparative aux proportions de diamètres connues avant la carbonisation. Pour valider cette nouvelle démarche nous avons dans un premiers temps travaillé sur les proportions par classe de rayons connues avant la carbonisation, c'est à dire sur les histogrammes construits à partir de la « décomposition » virtuelle des bûches.

Dans un premier temps nous avons travaillé sur les données connues avant la carbonisation, en utilisant les proportions par classes de rayons obtenues à partir de la décomposition virtuelle. Cette étape permet de vérifier la capacité de cette approche à retrouver les proportions de diamètres à partir de la comparaison aux soixante et une simulations. Les résultats obtenus sur ces données sont particulièrement satisfaisants, puisque l'on retrouve quasiment les proportions de diamètres mis dans les meules initialement.

Par la suite, nous avons appliqué cette démarche sur les données issues de l'analyse dendro-anthracologique. Les résultats obtenus sont cohérents, seuls quelques cas particuliers ne permettent pas d'accéder aux proportions connues avant la carbonisation.

3.2.1. Association des données de l'expérimentation aux groupes de simulations à partir de l'Analyse Factorielle Discriminante

Pour conduire cette analyse comparative entre les histogrammes issus des charbonnières expérimentales (avant et après carbonisation) et les histogrammes des soixante et une simulations, l'Analyse Factorielle Discriminante a une fois encore été d'une grande aide. Celle-ci permet d'associer chaque essence de chaque charbonnière au groupe de simulation le plus cohérent, indiquant même la ou les simulations qui s'approche le plus des données dendro-anthracologiques (figure 105).

De façon générale on peut distinguer les trois charbonnières à travers cette analyse. La charbonnière aux petits diamètres (en bleu) est associée aux groupes 1 et 2, alors que la charbonnière aux gros diamètres (en rouge) est associée aux groupes 3 et 4, enfin la charbonnière au mélange de diamètres (en vert) est associée quant à elle aux groupes 2 et 3.

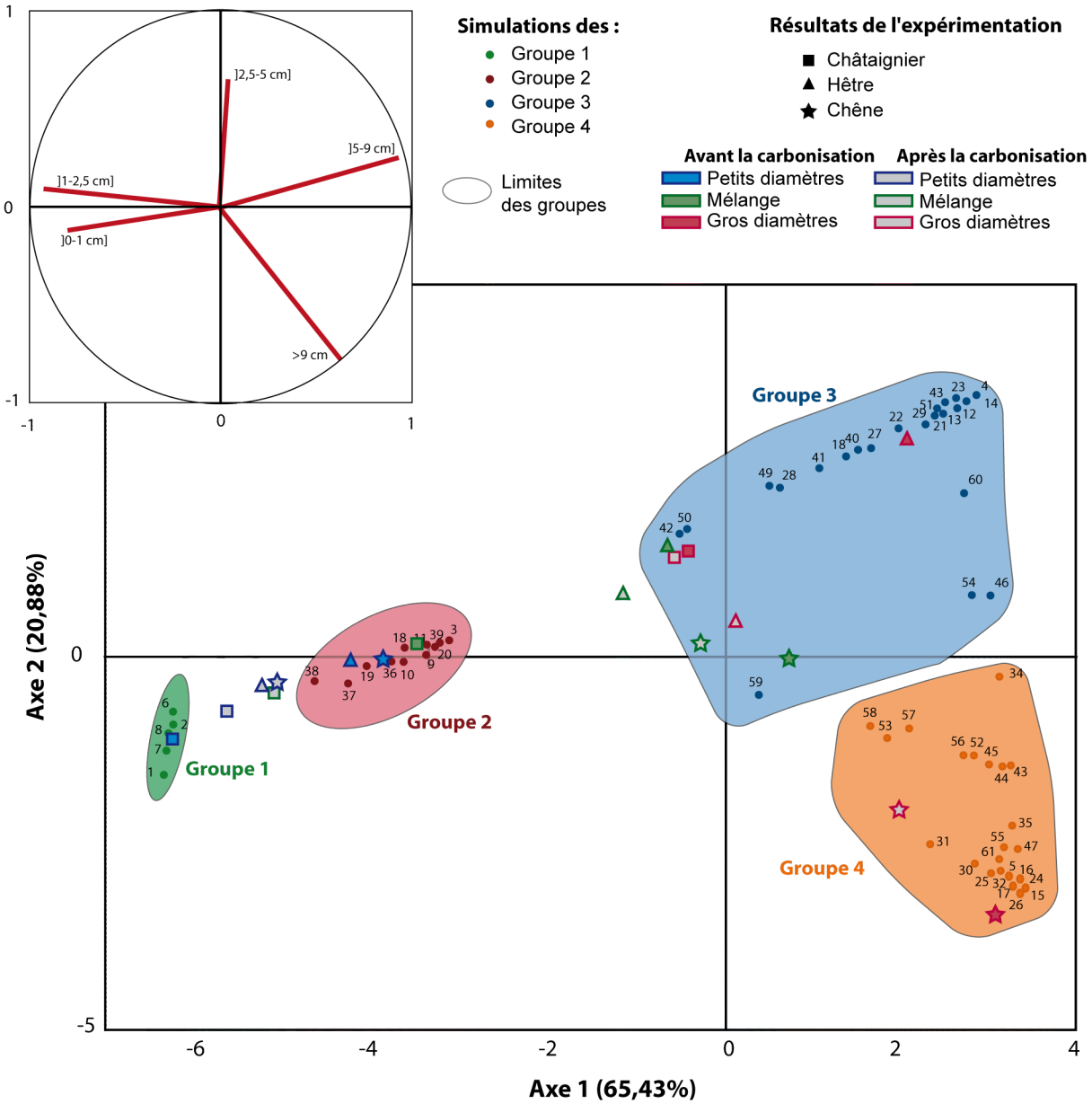


Figure 105 : Présentation de l'Analyse Factorielle Discriminante comparant les données de l'expérimentation avant et après carbonisation aux soixante et une simulations

Cette première analyse révèle déjà de bons résultats. En effet, la proximité des données de la charbonnière aux petits diamètres avec le groupe 1 et 2, met en évidence une utilisation uniquement de bois inférieurs à 10 cm de diamètre, ce qui en l'occurrence

correspond bien aux choix des bois placés dans cette charbonnière.
L'association des données de la charbonnière aux gros diamètres avec le groupe 3 pour le hêtre et le châtaignier témoigne bien d'une utilisation de « gros bois » en majorité. Le chêne de cette charbonnière s'apparente quant à lui au groupe 4, ce qui est cohérent car cela correspond bien à une utilisation de « très gros bois » (figure 105).

3.2.2. Une bonne restitution des diamètres à partir des données connues avant la carbonisation

La comparaison des proportions connues avant la carbonisation avec les soixante et une simulations présente dans la majorité des cas des résultats particulièrement satisfaisants. On retrouve généralement les classes de diamètres employées, et la classe dominante est globalement identifiée (annexes 19 à 27). Prenons l'exemple du hêtre de la charbonnière aux petits diamètres (figure 106 A) et du châtaignier de la charbonnière au mélange de diamètres (figure 106 B).

Sur ces deux exemples, la simulation s'approchant le plus de la morphologie des histogrammes est la simulation 19, qui correspond à un assemblage de « petits bois » et de « bois moyens » avec un nombre de bûches de « petits bois » plus important. Cette restitution correspond globalement aux diamètres de bois mis dans ces meules, seules les faibles proportions de « gros bois » ne sont pas identifiées à travers cette analyse. En effet, aucune simulation ne présente de si faibles proportions dans la classe]5-9 cm], c'est pourquoi lors de l'analyse comparative nous avons choisi des simulations composées de 3 classes de rayons alors que les données connues avant la carbonisation en présentent 4.

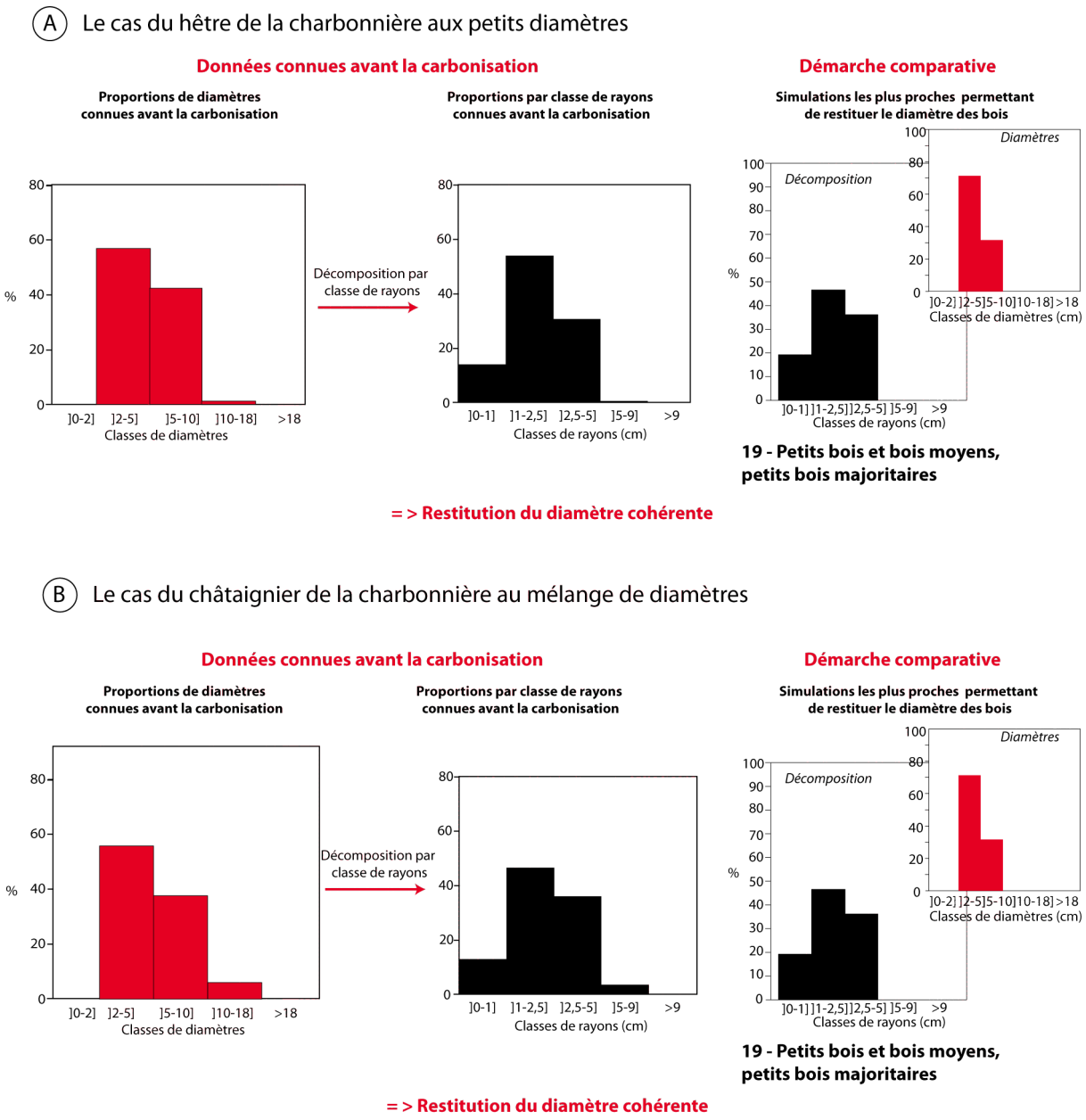


Figure 106 : Exemple de traitement des données connues avant la carbonisation à partir de la méthode inductive. A) Le hêtre de la charbonnière aux petits diamètres. B) Le châtaignier de la charbonnière au mélange de diamètres

Dans certains cas, à l'issue de l'analyse comparative on identifie bien les classes de diamètres employées en revanche on ne retrouve pas les bonnes proportions. On retrouve bien les classes majoritaires et minoritaires, mais les proportions obtenues à partir des simulations ne correspondent pas exactement aux proportions connues avant la carbonisation. Prenons le cas du châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres et celui du chêne de la charbonnière au mélange de diamètre.

Les données obtenues sur le châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres permettent certes de retrouver les deux classes de diamètres employés, mais les proportions restituées à l'issue de l'analyse comparative sont inversées, on retrouve plus de « petits bois » alors que les « très petits bois » étaient majoritaires dans les proportions connues avant la carbonisation (figure 107 A).

En ce qui concerne le chêne de la charbonnière au mélange de diamètres, on retrouve bien les diamètres de bois employés, ainsi que la classe majoritaire, « les bois moyens », en revanche les proportions de « gros bois » de près de 40 % connues avant la carbonisation ne sont absolument pas restituées à l'issue de la démarche comparative (figure 107 B).

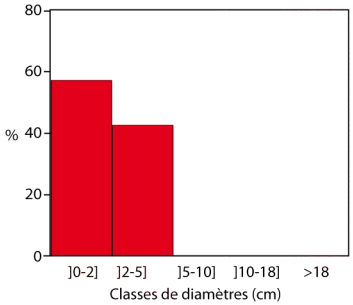
Ces écarts s'expliquent par le choix des assemblages lors de la construction des simulations. Les proportions proposées lors de la création des simulations sont de 70 % de « petits bois » et 30 % de « bois moyens » ; or les proportions avant la carbonisation sont plus proches de 60 % et 40 %. On entrevoit dès lors la nécessité à l'avenir de multiplier le nombre de simulations pour s'approcher au mieux de la réalité des assemblages de diamètres.

Si l'on retrouve globalement les proportions de diamètres à partir des proportions par classe de rayons connues avant la carbonisation on peut se demander si on les retrouve également après la carbonisation.

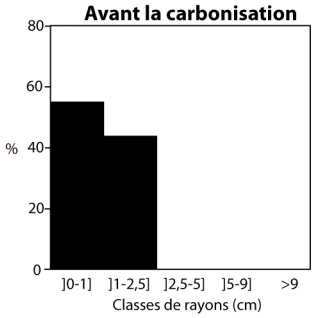
A Le cas du châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres

Données connues avant la carbonisation

Proportions de diamètres connues avant la carbonisation

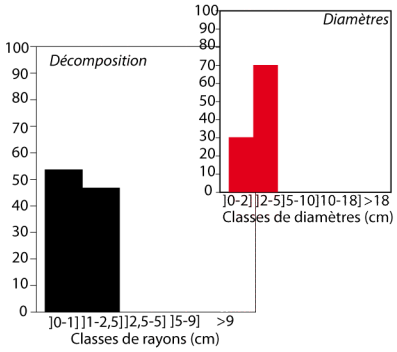


Proportions par classe de rayons connues avant la carbonisation



Démarche comparative

Simulations les plus proches permettant de restituer le diamètre des bois



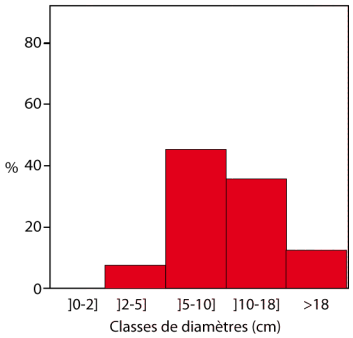
8 - Très petits bois et petits bois, petits bois majoritaires

= > Inversion de la classe majoritaire

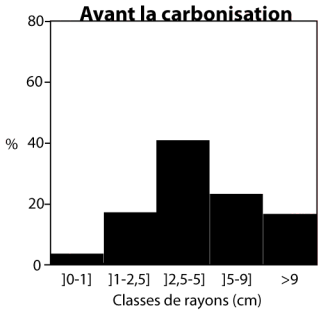
B Le cas du chêne de la charbonnière au mélange de diamètres

Données connues avant la carbonisation

Proportions de diamètres connues avant la carbonisation

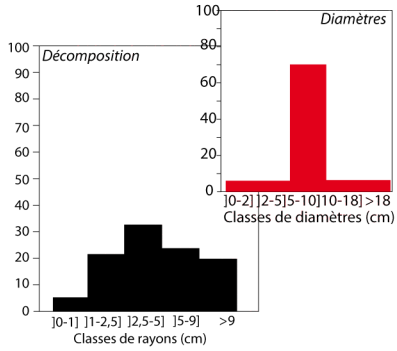


Proportions par classe de rayons connues avant la carbonisation



Démarche comparative

Simulations les plus proches permettant de restituer le diamètre des bois



59 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, bois moyens majoritaires

= > Dominance de la classe des "bois moyens" mais sous évlauation des "gros bois"

Figure 107 : Exemple de traitement des données connues avant la carbonisation à partir de la méthode inductive. A) Le châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres. B) Le chêne de la charbonnière au mélange de diamètres

3.2.3. Restituer le diamètre des bois à partir des données dendro-anthracologiques

Les résultats obtenus après analyse des restes charbonneux permettent dans la majorité des cas d'accéder aux diamètres des bois mis dans les meules, il est en revanche plus délicat de restituer précisément les proportions des assemblages (annexes 12 à 20).
Prenons l'exemple du hêtre de la charbonnière aux petits diamètres (figure 108 A), du châtaignier et du chêne de la charbonnière au mélange de diamètres (figure 108 C).

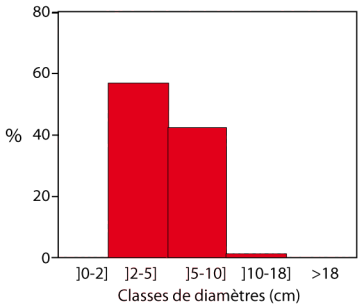
Les résultats obtenus sur ces trois exemples sont satisfaisants : on retrouve en effet les gammes de diamètres employés dans ces charbonnières et pour ces essences, ainsi que la classe majoritaire. En revanche, on ne retrouve pas exactement les proportions connues avant la carbonisation.

En ce qui concerne le hêtre de la charbonnière aux petits diamètres (figure 108 A) et le châtaignier de la charbonnière au mélange de diamètres (figure 108 B), ce sont les « petits bois » et les « bois moyens » qui étaient majoritaires avant la carbonisation; en revanche, la comparaison avec la simulation 38, restitue une utilisation de « petits bois » en majorité avec de faibles proportions de « très petits bois » et de « bois moyens ». Si l'on identifie bien la classe majoritaire connue avant la carbonisation, on n'accède pas aux proportions exactes de diamètres employés dans ces meules et pour ces essences

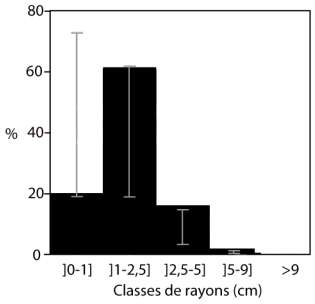
Pour le chêne (figure 108 C) l'écart entre les proportions de diamètres restituées et celles connues avant la carbonisation est plus important. On retrouve effectivement la classe majoritaire, les « bois moyens » ; en revanche, les proportions proches de 35 % de « gros bois » ne sont pas mises en évidence. Ces différences s'expliquent par le manque de simulations à comparer aux données dendro-anthracologiques plutôt que par une déformation des spectres liés à la carbonisation, car nous l'avons vu dans le chapitre 4, les proportions par classe de rayons sont très proches de celles connues avant la carbonisation.

A Le cas du hêtre de la charbonnière aux petits diamètres

Proportions de diamètres connues avant la carbonisation

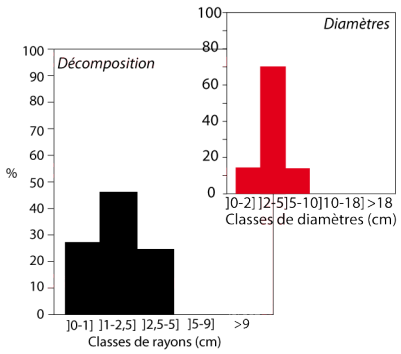


Proportions par classe de rayons obtenues après la carbonisation



Démarche comparative

Simulations les plus proches permettant de restituer le diamètre des bois

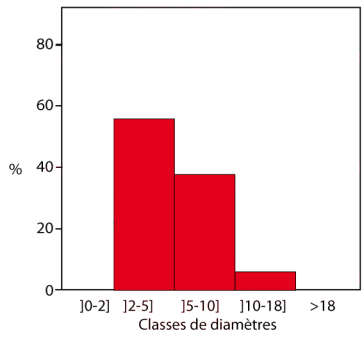


= > Restitution du diamètre cohérente

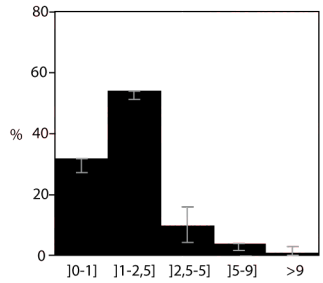
38 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires

B Le cas du châtaignier de la charbonnière au mélange de diamètres

Proportions de diamètres connues avant la carbonisation

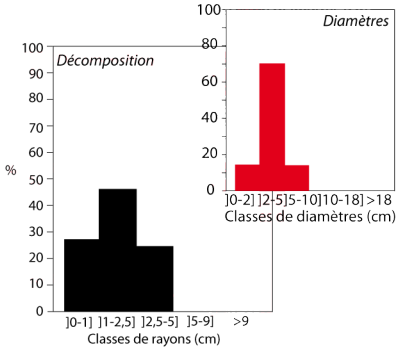


Proportions par classe de rayons obtenues après la carbonisation



Démarche comparative

Simulations les plus proches permettant de restituer le diamètre des bois

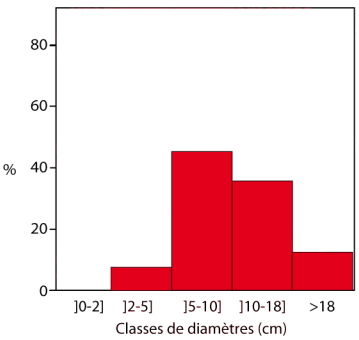


38 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires

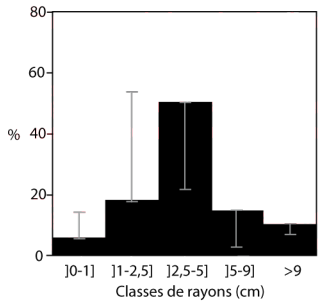
= > Restitution du diamètre cohérente

C Le cas du chêne de la charbonnière au mélange de diamètres

Proportions de diamètres connues avant la carbonisation

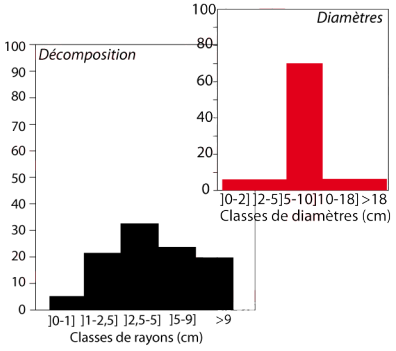


Proportions par classe de rayons obtenues après la carbonisation



Démarche comparative

Simulations les plus proches permettant de restituer le diamètre des bois



59 - Mélange de toutes les gammes de diamètres,bois moyens majoritaires

Proportions possibles en prenant en considération les marges d'erreur

= > On retrouve les classes de diamètres et la classe majoritaire

Figure 108 : Exemple de restitution des proportions de diamètres à partir des spectres dendro-anthracologiques. A) Le hêtre de la charbonnière aux petits diamètres. B) Le châtaignier de la charbonnière au mélange de diamètres. C) Le chêne de la charbonnière au mélange de diamètres

3.2.4. Une sous estimation des diamètres restitués pour la charbonnière aux gros diamètres

A l'issue de cette analyse on constate que la charbonnière aux gros diamètres présente des résultats moins satisfaisants (annexes 13, 14 et 15). En effet, à l'issue de la démarche comparative les proportions de diamètres restituées sont systématiquement sous évaluées.

Prenons les exemples du hêtre et du chêne (figure 109). Le hêtre présentait de très fortes proportions de « gros bois » avant la carbonisation. A l'issue de l'analyse dendro-anthracologique, le profil en cloche obtenu s'associe avec la simulation 50 qui représente une dominance de « bois moyens ». On retrouve bien la présence d'une classe très majoritaire par rapport aux autres classes de diamètres, en revanche celle-ci est décalée d'une classe (figure 109 A).
En ce qui concerne le chêne, à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique on retrouve bien le profil nettement croissant, mais l'écart entre les proportions obtenues entre les classes]5-9 cm] et « >9 cm » sont plus atténuées que pour les données connues avant la carbonisation. De ce fait, l'histogramme s'apparente plus à la simulation 31 qui correspond à un mélange de « bois moyens » et de « très gros bois ». On ne retrouve pas la composition initialement mis dans la meule, les diamètres restitués sont largement sous évalués (figure 109 B).

Ce décalage de classe peut s'expliquer de différentes façons. Nous l'avons précédemment évoqué, la charbonnière aux gros diamètres présente un biais sur les proportions connues avant la carbonisation, les bûches entières n'ayant pas forcément été placées dans la même meule lors de la construction. Lors de la comparaison des proportions par classe de rayons avec les données connues avant la carbonisation (cf chapitre 4), nous avions déjà constaté des écarts.

Cet écart peut également s'expliquer par une correction des rayons de courbure insuffisante pour les gros diamètres, ne permettant pas de rectifier la perte de volume induite par la carbonisation.

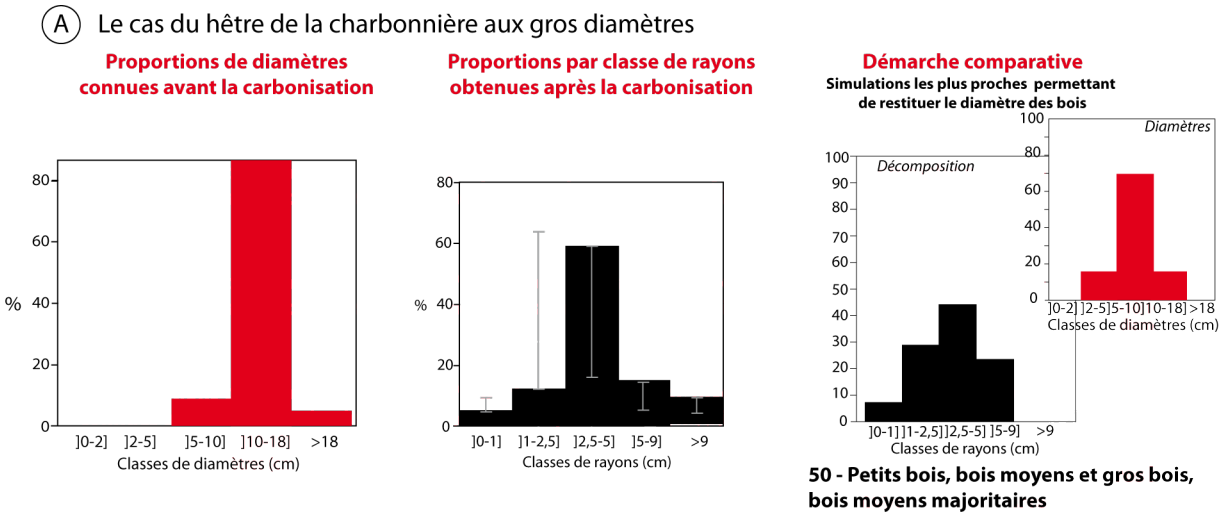


Figure 109 : Exemple ne permettant pas une bonne restitution du diamètre des bois, A) le cas du hêtre, B) le cas du chêne de la charbonnière aux gros diamètres

Dans cette charbonnière, le châtaignier présente également une sous représentation des diamètres restitués, mais cela semble s'expliquer par un autre facteur.

En effet, à l'issue de l'analyse comparative on retrouve une utilisation des « bois moyens » majoritaires alors que ce sont les « gros bois » qui étaient majoritaires dans les données connues avant la carbonisation (figure 110). De plus on observe ici l'apparition de « très petits bois » alors qu'aucune bûche inférieure à 10 cm de diamètre n'a été placée dans cette charbonnière. Ce décalage d'une classe peut s'expliquer par un emploi en grande

quantité de bûches ayant des diamètres proches de la borne inférieure des « gros bois », c'est à dire proche de 10 cm, auquel cas, on retrouve peu de fragments de charbon ayant des rayons de courbure supérieurs à 5 cm. En effet, rares étaient les bûches ayant des diamètres supérieurs à 10 cm, lorsque c'était le cas, ils ne dépassaient cette limite que de quelques centimètres.

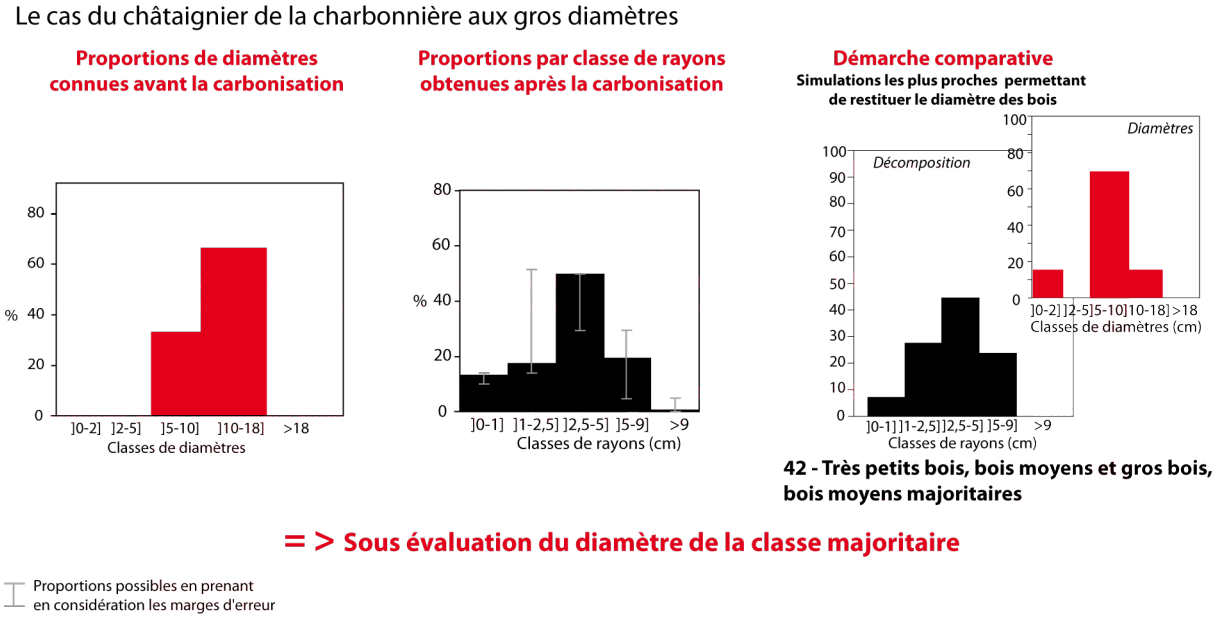


Figure 110 : Le cas particulier du châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres

3.2.5. La nécessité de multiplier les simulations

Les résultats présentés ici sont satisfaisants. L'approche comparative avec des histogrammes théoriques permet de retrouver dans la majorité des cas la composition en diamètres des bois employés.

Il est bien évident que l'on ne retrouve pas précisément l'image de départ en raison du nombre réduit de simulations créées à ce jour. On constate dans certains cas la difficulté de choisir entre les simulations, car aucune n'est vraiment identique aux profils des histogrammes obtenus à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique. Dans le cadre de cette étude nous avons privilégié la construction d'un faible nombre de simulations, en choisissant des proportions très caractéristiques, afin de bien maitriser l'ensemble des histogrammes et de développer une approche comparative à la fois statistique (à travers

l'Analyse Factorielle Discriminante) et visuelle (simplifiée par la construction des quatre groupes de simulations).

Nous avons conscience qu'à l'avenir il sera nécessaire d'augmenter le nombre de simulations théoriques. Pour représenter un éventail le plus large possible d'assemblages de diamètres de bois, il serait alors nécessaire de réaliser des mélanges plus diversifiés.
Ce travail a déjà été entamé dans le cadre d'une collaboration avec Christelle Belingard (chercheure associée à Géolab UMR CNRS 6042) afin de développer des outils également valables pour des recherches appliquées (Belingard et Paradis-Grenouillet, à paraître). A ce jour nous comptons près de 200 simulations différentes permettant ainsi d'approcher au mieux la restitution du diamètre des bois.

Enfin, la simple comparaison à des simulations théoriques est loin d'être suffisante pour approcher l'image des peuplements exploités. En effet, à partir de cette approche nous pouvons aujourd'hui seulement restituer l'image du « tas de bois » employés. Pour retrouver l'image des peuplements il est donc primordial d'établir des histogrammes de référence correspondant non plus à un assemblage de bûches mais plutôt à l'image de la forêt. Cela consiste donc à calculer soit de façon théorique, soit sur le terrain les proportions de volume par classe de diamètres apportées par la coupe d'un arbre entier.
Quelle forme aura l'histogramme pour une coupe à blanc d'un taillis, pour l'utilisation du houppier d'un arbre centenaire, pour l'exploitation d'une futaie dense, ou encore à l'issue d'une coupe de broussailles ou de haies ? Les possibilités sont nombreuses ; il est donc nécessaire de les identifier et de rechercher les diamètres des différentes parties des arbres (tronc, branches etc.) pour ensuite procéder à la « décomposition » virtuelle afin d'obtenir des histogrammes de référence facilement comparables aux spectres obtenus à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique.

3.3. Vers des histogrammes représentant les types de peuplements, les modes de gestion

Grâce à l'approche expérimentale conduite dans le cadre de cette étude, nous pouvons établir un spectre de référence représentant un mode de gestion des forêts : le taillis. En effet, lors de la coupe du taillis de châtaignier, nous avons procédé à une coupe à blanc d'une quinzaine de souches. Les bois ont ensuite été débités en bûches de 50 cm depuis la base jusqu'au sommet de la tige, avec pour diamètre minimal 2 cm. En mesurant l'ensemble des bûches produites nous pouvons ainsi facilement définir les proportions par classe de diamètres ainsi que les proportions par classe de rayons.

A l'issue de la coupe de ce taillis de châtaignier âgé de 12 ans, nous avons débité 1758 bûches de 50 cm de longueur environ ; toutes les bûches ont été mesurées, ce qui nous permet aujourd'hui de restituer la composition en diamètres du « tas de bois » formé par la coupe de ce peuplement.
En calculant le nombre de bûches par classe de diamètres on obtient 51 % de bûches ayant des diamètres compris entre 2 et 5 cm et 44 % de bûches ayant des diamètres compris entre 5 et 10 cm (figure 111 A). Lorsque les bûches ont été « décomposées » virtuellement on obtient un histogramme au profil en « cloche » avec de fortes proportions au sein des classes]1-2,5 cm] et]2,5-5 cm] avec respectivement 43 et 42 %. On observe tout de même des proportions de volume non négligeables au sein de la classe]0-1 cm] avec près de 12 %. Enfin, les proportions de volume dans la classe]5-9 cm] sont beaucoup plus faibles (figure 111 A). Il est intéressant de constater que ce genre de profil ne s'apparente à aucune simulation, ce qui met une fois encore en évidence la nécessité d'augmenter le nombre de simulations tout en réalisant un travail similaire sur d'autres peuplements et sur d'autres essences.

Nous espérons à l'avenir pouvoir réaliser le même genre d'approche sur d'autres peuplements en particulier grâce à une collaboration avec des agents de l'Office National de la Forêt de la Braconne (Charente).

Par ailleurs, dans le cadre de cette étude, nous avons comparé cet histogramme aux résultats obtenus par l'analyse des charbons de châtaignier provenant de la charbonnière au mélange de diamètres. Les données connues avant la carbonisation et celles obtenues à l'issue de

l'analyse des charbons de bois s'approchent fortement de l'histogramme obtenu pour le taillis de châtaignier (figure 111 B). On retrouve les faibles proportions au sein de la classe]5-9 cm] ce qui n'était pas possible lors de la comparaison avec les simulations.

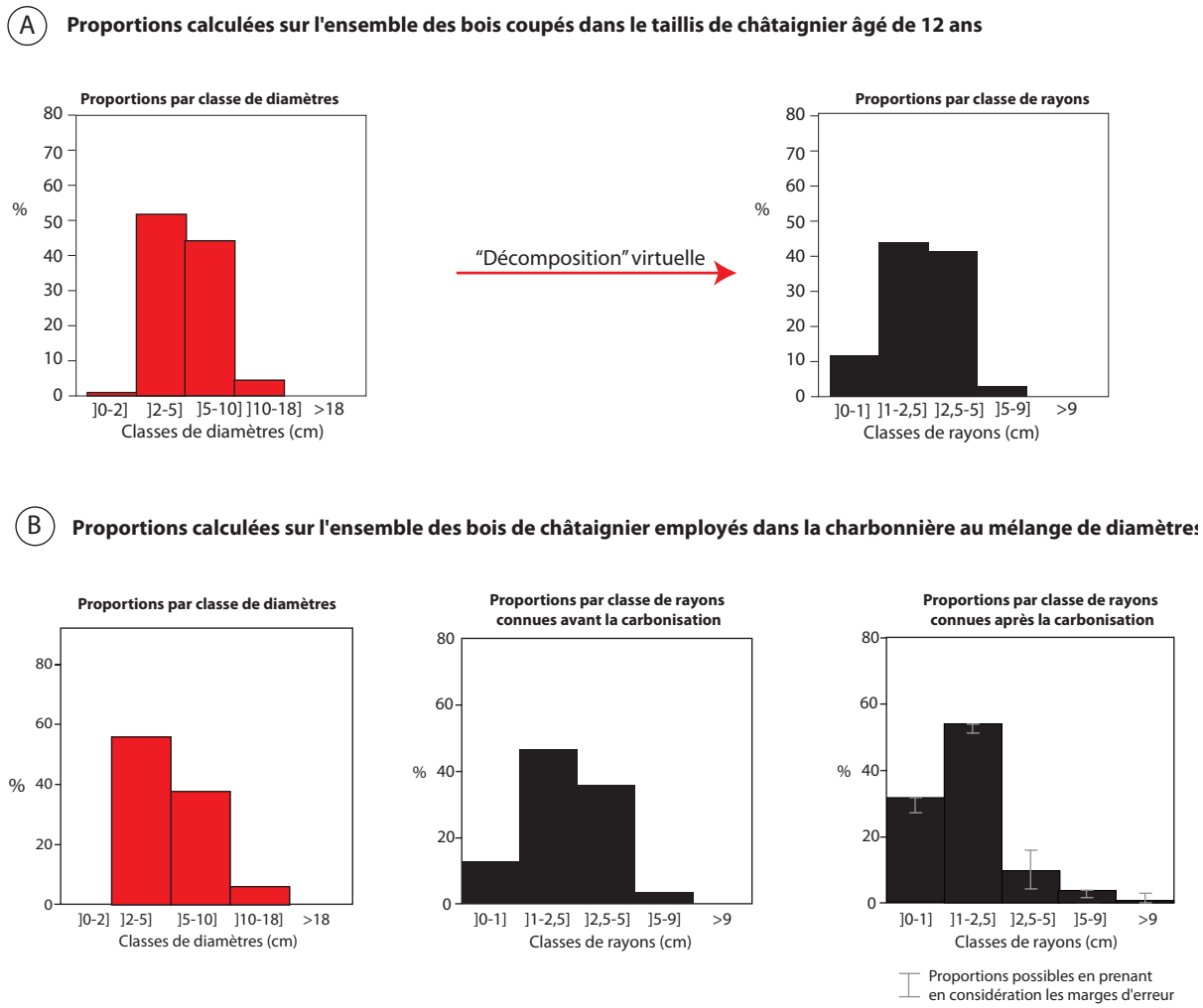


Figure 111 : Construction des spectres de référence pour un taillis de châtaignier âgé de 12 ans et comparaison de ces histogrammes avec les données obtenues sur le châtaignier de la charbonnière expérimentale au mélange de diamètres

Cette approche, aujourd'hui encore peu développée, doit être généralisée, afin de créer une véritable base de données prenant en considération différents peuplements. Un travail considérable de modélisation de l'architecture des différents types de peuplement associés à des mesures sur des peuplements réels reste alors à conduire pour associer aux simulations théoriques des « simulations réfléchies » ayant une signification écologique ou encore révélant un mode de gestion forestière ou de collecte du bois pour le combustible.

Conclusion

Dans le cadre de cette étude nous avons pu dans un premier temps tester les modèles de restitution du diamètre des bois existants (Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Ludemann, 2006, 2008 ; Dufraisse, 2002, 2006 ; Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011) à partir de l'important corpus anthracologique obtenu sur les trois charbonnières expérimentales. Puis, en nous appuyant sur ces deux modèles nous avons, dans un second temps, développé une nouvelle approche. La comparaison des données dendro-anthracologiques à des simulations théoriques permet aujourd'hui d'apporter un regard nouveau à la restitution du diamètre des bois. Malgré les processus de fragmentation et les erreurs associées à la mesure du rayon de courbure, on constate qu'il est possible de restituer globalement l'image du diamètre des bois charbonnés.

Si, pour cette analyse, nous avons construit les spectres dendro-anthracologiques en fonction du volume des charbons et en prenant en considération l'ajout de l'erreur associée (+ 26 %) pour le chêne et le hêtre, il est encore nécessaire d'affiner les corrections à appliquer à l'ensemble des mesures de rayons de courbure réalisées, et cela sur une grande variété d'essences. Il est également indispensable de prendre en considération les types de carbonisation qui conduisent probablement à une altération différentielle des charbons de bois. Cette démarche permettra à l'avenir une restitution plus fidèle du diamètre des bois.

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude sont assez encourageants pour envisager d'aborder la question du diamètre des bois charbonnés à partir de l'analyse des charbons de bois retrouvés sur les plateformes archéologiques.

Chapitre 6 : Les « forêts métallurgiques » du mont Lozère

Introduction

Les plateformes de charbonnage sont de parfaits témoins pour retracer l'histoire des forêts charbonnées. Les chapitres précédents ont permis de montrer combien leur étude était riche d'enseignements pour comprendre l'histoire des forêts et notamment des « forêts métallurgiques ».

De la localisation des plateformes à la cartographie des anciens espaces forestiers, l'approche spatiale, développée depuis les années 1980, permet de restituer de façon assez précise les anciens contours des espaces forestiers, la présence de plateformes de charbonnage témoignant de la présence de forêts par le passé. Les charbonnières les plus élevées en altitude, situées souvent dans des espaces aujourd'hui asylvatiques sont par ailleurs d'excellents témoins des contours forestiers passés.

A l'approche spatiale s'ajoute la dimension temporelle. La datation des horizons charbonneux autorise, dans certains cas, une lecture diachronique de la végétation charbonnée. Généralement réemployées sur plusieurs générations, les plateformes de charbonnage peuvent témoigner de différentes phases d'activité. Nous l'avons vu dans le chapitre 3, la stratigraphie au sein des horizons charbonneux semble être lissée, comme moyennée progressivement au cours des siècles d'exploitation, en conservant toutefois des charbons plus anciens en profondeur et de plus récents en surface.
Enfin, en ajoutant l'analyse anthracologique à ces deux informations, il est non seulement possible d'identifier les essences mais également de retrouver les diamètres de bois

charbonnés. Les expérimentations précédemment décrites ont montré la capacité des protocoles d'étude à restituer la physionomie des forêts charbonnées

Dans le cadre de cette étude les protocoles précédemment mis en place ont été appliqués pour étudier la « forêt métallurgique » du mont Lozère. Le secteur du mont Lozère est un territoire privilégié pour notre étude. En effet, plus de 230 plateformes de charbonnage ont été retrouvées à proximité des vestiges d'ateliers de réduction sur une zone d'environ 50 km^2. Ces vestiges d'activités métallurgiques et de charbonnage datent tous de l'époque médiévale ; ils sont comme figés dans le temps, aucun réemploi des plateformes ne venant masquer l'information médiévale.

Les recherches conduites maintenant depuis près de 15 ans sur le massif montrent la complexité de ce territoire. La multiplicité des pratiques, à la fois proto-industrielles et agropastorales implique une véritable organisation des activités et le partage de l'espace. Il ne s'agit pas ici d'étudier la diversité des pratiques mais plutôt d'apporter un éclairage sur l'image de la forêt charbonnée à l'époque médiévale.

1. Le mont Lozère, un territoire connu pour son passé métallurgique

Le mont Lozère, situé sur la bordure sud-est du Massif central (figure 112), aujourd'hui réputé pour ses vastes espaces ouverts protégés par le Parc national de Cévennes, présentait il y a un millénaire un tout autre paysage. La découverte de nombreux épandages de scories de plomb retrouvés sur les versants, témoigne d'une activité métallurgique importante sur ce territoire. Ces ateliers de réduction, gourmands en combustible s'implantent généralement au plus près des massifs boisés. Cela signifie donc que ces paysages ouverts, considérés longtemps comme « naturels », aujourd'hui comme des paysages « patrimoniaux » issus d'une activité agro-pastorale ancestrale, étaient auparavant couverts de forêts exploitées pour produire le combustible nécessaire au fonctionnement des fours de réduction.

Depuis maintenant plus de 15 ans, des recherches pluridisciplinaires sont conduites pour étudier la multiplicité des pratiques façonnant les paysages au cours des siècles.

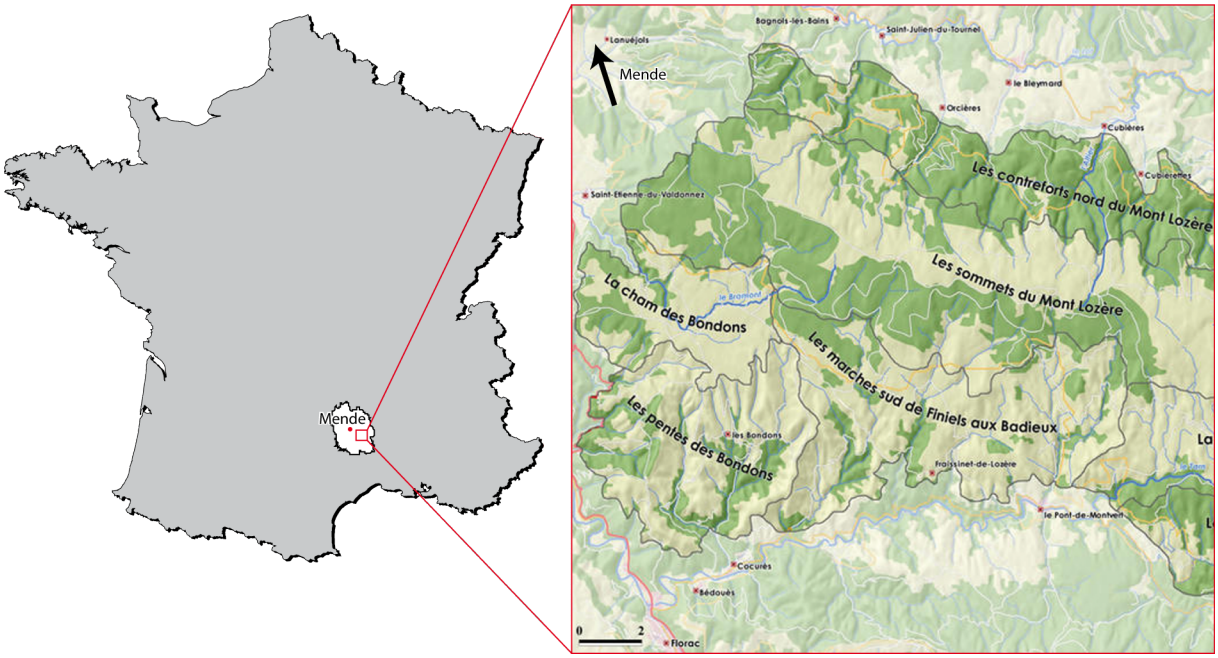


Figure 112 : Carte de localisation du mont Lozère (Kleitz, 2008 modifié)

1.1. Historique des recherches conduites sur le mont Lozère.

L'étude de la métallurgie du plomb argentifère sur le mont Lozère est initiée en 1997 suite au signalement, par un agent du Parc national des Cévennes, de vastes épandages de scories dans la partie ouest du massif (figure 112). A. Ploquin, paléométallurgiste au Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CNRS - Nancy), procède alors à un premier inventaire de ces vestiges avec la collaboration de bénévoles du Centre d'Etude et de Recherches Littéraires de Mende (CERL). J.Peytavin y a grandement contribué. Prospections sur le terrain et recherches dans les archives permettent rapidement de faire un état de la question sur la connaissance de sites archéologiques, et l'on constate que ces vestiges sont connus par les érudits locaux. Le Président de l'association (B. Bardy) du CERL avait d'ailleurs déjà publié en 1957 un article dans le bulletin de l'association faisant référence à ces épandages de scories (Morel et Bardy, 1957). Des mentions plus anciennes sont également retrouvées avec notamment le signalement, par L. de Malafosse 1891, de « plombières » sur le mont Lozère.

En 1999, l'inventaire des sites à scories est poursuivi par S. Lhullier, stagiaire au Parc National de Cévennes, sous la direction de A. Ploquin et de R. Dejean, ce dernier ayant ainsi référencé plus d'une cinquantaine d'indices de réduction (Lhullier, 1999).

La découverte d'un si grand nombre de sites de réduction du plomb argentifère fait de ce territoire un cas exceptionnel. En effet, avant la découverte de ces vestiges on connaissait peu de sites de réduction de minerai de plomb et les recherches sur la métallurgie des non-ferreux étaient globalement centrées sur l'étude des sites d'extractions (Bailly-Maître, 1999, 2011; Py, 2009 ; Ancel *et al.*, 2011).

Pour approfondir au mieux l'ensemble des questions concernant les activités métallurgiques du mont Lozère, un Programme Collectif de Recherches est initié par A. Ploquin. Intitulé « Plomb ancien du mont Lozère, à la recherche des mines, des minerais, des ateliers, des paysages et des hommes » ce dernier regroupe des chercheurs aux disciplines très variées : archéologues, paléométallurgistes, géographes, historiens, paléoenvironnementalistes (Ploquin *et al.*, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2011). Sur ces problématiques de nombreux travaux académiques ont été conduits, mémoires de master

et thèses, chacun apportant de nouveaux éléments pour restituer l'histoire de ce territoire au passé métallurgique (Lhullier, 1999 ; Allée 2003; Laurent, 2005; Baron, 2005 ; Pulido Avila, 2006 ; Paradis, 2007).

1.2. Les acquis des programmes de recherches

La découverte de ces sites sur les versants à l'ouest du mont Lozère loin des sites d'extraction et de vestiges d'habitat pose de nombreuses questions. D'où provient le minerai ? Et quelles sont les raisons qui ont conduit à installer ces ateliers à ces emplacements ?
A partir des spécialités de chacun des membres du Programme Collectif de Recherches, différents ateliers se sont organisés permettant ainsi d'aborder la question de l'approvisionnement en minerai, d'étudier le fonctionnement des ateliers de réduction, de réfléchir à l'organisation spatiale de ce territoire et d'expliquer les raisons de l'implantation des ateliers déconnectés des zones d'extraction minière.

1.2.1. Des ateliers médiévaux

Les nombreuses campagnes de prospection ont permis d'identifier à ce jour 76 sites de réduction, tous concentrés sur une bande de 10 km de long et de 6 km de large et localisés entre 1300 et 1500 m d'altitude (Lhullier, 1999 ; Ploquin et al., 2002, 2004 ; Allée et Paradis, 2007 ; Allée et al., 2011) (figure 113).

A l'issue de cet inventaire, trois contextes taphonomiques ont été définis (figure 113) (Allée et Paradis 2007 ; Allée et al., 2011).
Dans la majorité des cas, ce sont des sites particulièrement bien visibles qui ont été répertoriés. Repérables par de vastes épandages de scories sur lesquels la végétation ne peut pas se développer en raison des fortes teneurs en plomb contenues dans le sol, ces vestiges semblent avoir subi des processus érosifs importants.

A l'inverse on peut également retrouver des sites colluvionnés. Ces vestiges plus aléatoires à identifier, du fait d'un recouvrement important des scories par les sédiments, sont particulièrement intéressants à étudier. En effet, à l'occasion de coupes sédimentaires on

peut observer des traces de rubéfactions, des indices de sols d'ateliers riches en charbon de bois.

Enfin on retrouve également des sites alluviaux; la découverte de scories dans ce cas se fait alors dans des dépôts détritiques fortement remaniés. La découverte de ces scories ne permet pas une localisation précise de l'atelier mais indique seulement la présence d'ateliers de réduction à l'amont de l'observation.

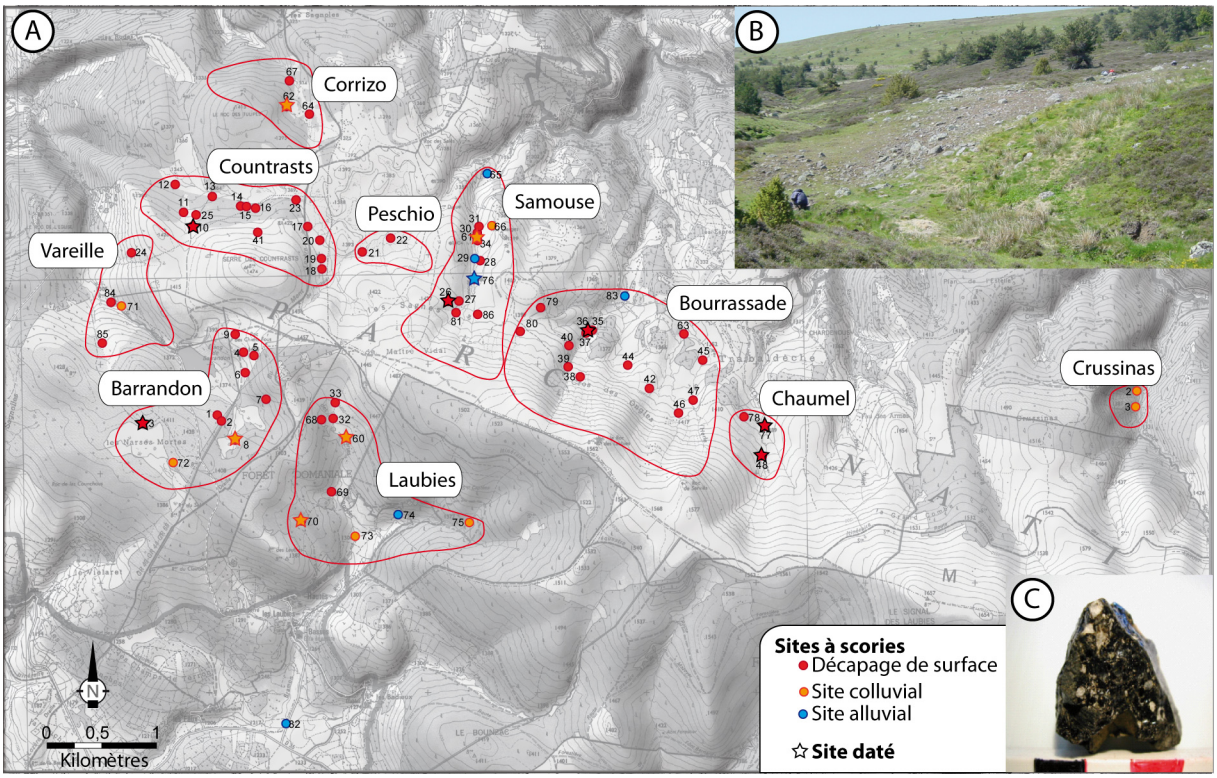


Figure 113 : A) Carte de localisation des sites d'ateliers indiquant leur contexte taphonomique. B) Photographie du site à scories 48 (cliché M.C. Bailly Maître). C) Photographie d'une scorie noire (cliché A. Ploquin)

Lors des prospections aucun indice archéologique ne permettait d'envisager une période de fonctionnement de ces ateliers ; ce sont les datations de charbon de bois par la méthode du carbone 14 qui associent cette activité à l'époque médiévale. A ce jour 12 sites sont datés, six ont fait l'objet d'un prélèvement en stratigraphie sur les niveaux correspondant aux sols d'atelier sur des sites décapés, cinq proviennent de sites colluvionnés et un site retrouvé dans les dépôts alluviaux a également été daté (figure 113). Sur les douze sites, huit présentent des datations comprises entre la fin du Xe siècle et la fin du XIIe siècle. Seuls trois ateliers sont datés des XIIIe et XIVe siècles. On peut se demander alors si cette concentration sur les phases les plus anciennes correspond à une activité plus intense autour du XIe siècle, ou bien s'il s'agit d'un hasard lié au choix des sites datés.

Bien que les contextes taphonomiques des sites datés soient différents on observe un fonctionnement de ces activités métallurgiques sur cinq siècles, entre le Xe et le XVe siècle (figure 114). En effet, on ne constate pas de différence de datation entre les charbons prélevés au niveau des sols d'ateliers et ceux provenant de dépôts détritiques ; bien qu'ils aient été remaniés, ils ne proviennent pas d'activité plus ancienne. Pour affiner ces datations et permettre une périodisation des activités métallurgiques il serait nécessaire de réaliser de nouvelles datations en privilégiant les prélèvements de charbon de bois sur les sols d'ateliers.

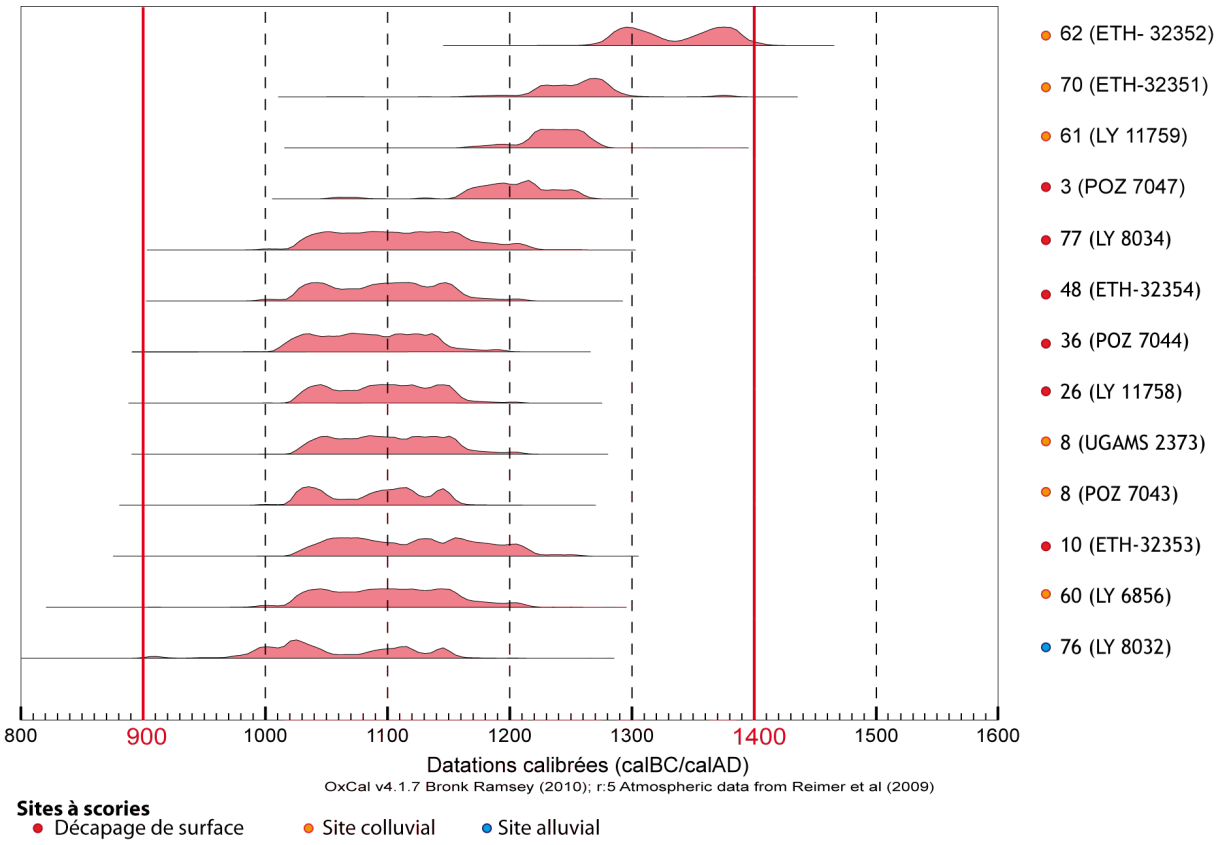


Figure 114 : Datation des ateliers de réduction

Ces nombreux sites de réduction médiévaux offrent un matériel d'étude privilégié pour appréhender les techniques de réduction finalement peu décrites dans les textes. Deux sites d'ateliers (les sites 3 et 8) ont fait l'objet de fouilles et ont révélé des résultats très inégaux (figure 115). En effet, seul le site 3 a permis d'identifier les restes de fours. Trois bases de fours, construites par un double cordon de blocs de granite plus ou moins épais et prenant la forme de U renversé, ont été découvertes (Ploquin et al., 2004, 2005, 2006, 2007 ; Bailly-

Maître, 2011). En revanche le site 8 n'a révélé que des traces fugaces, des indices de sols rubéfiés, une fosse à charbon sans livrer de structures de fours. Il reste encore un important travail à réaliser pour mieux comprendre le fonctionnement de ces fours, mais aussi pour obtenir plus d'informations ; il serait donc intéressant d'étudier des sites fossilisés par des colluvionnements. Mais la découverte de ces sites est souvent fortuite, par un sondage à la tarière (c'est le cas du site 80 retrouvé en bordure de tourbière), ou encore à l'issue d'entaille érosive.

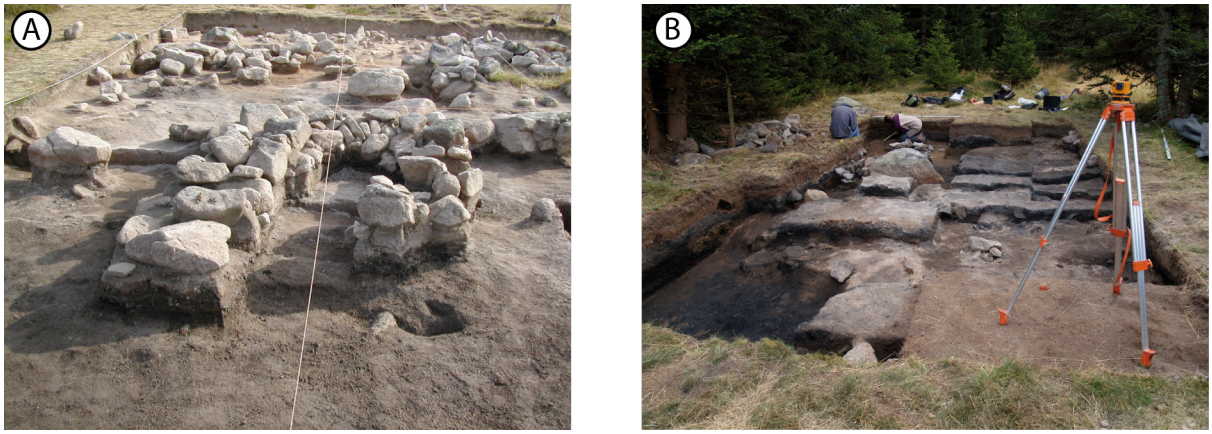


Figure 115 : Photographie des fouilles réalisées. A) Site 3 (Cliché A. Ploquin). B) Site 8 (Cliché A. Ploquin)

1.2.2. Des ateliers déconnectés des mines

A proximité des sites à scories aucune zone d'extraction minière n'a été identifiée. La recherche des lieux d'extraction du minerai a fait l'objet de plusieurs travaux : identification des vestiges miniers sur le terrain (Laurent, 2005) et recherche à travers des analyses géochimiques et isotopiques de la provenance des minerais traités sur le mont Lozère (Baron, 2005).

A ce jour on compte plus de 80 sites d'extractions minières situés au nord et au sud de la zone d'épandage de scories, tous situés plus bas en altitude (entre 900 et 1200 mètres d'altitude) (figure 116).

Les analyses géochimiques et isotopiques conduites par S. Baron sur les minerais prélevés dans les mines et les haldes ainsi que sur les scories retrouvées sur le mont Lozère ont permis d'identifier les secteurs d'approvisionnement en combustible. Il en ressort que seules les

mines du sud ouest ont été utilisées notamment dans les secteurs de Montmirat, des Bondons et de Bédouès Cocurès (Baron, 2005 ; Baron et al., 2006, 2011).

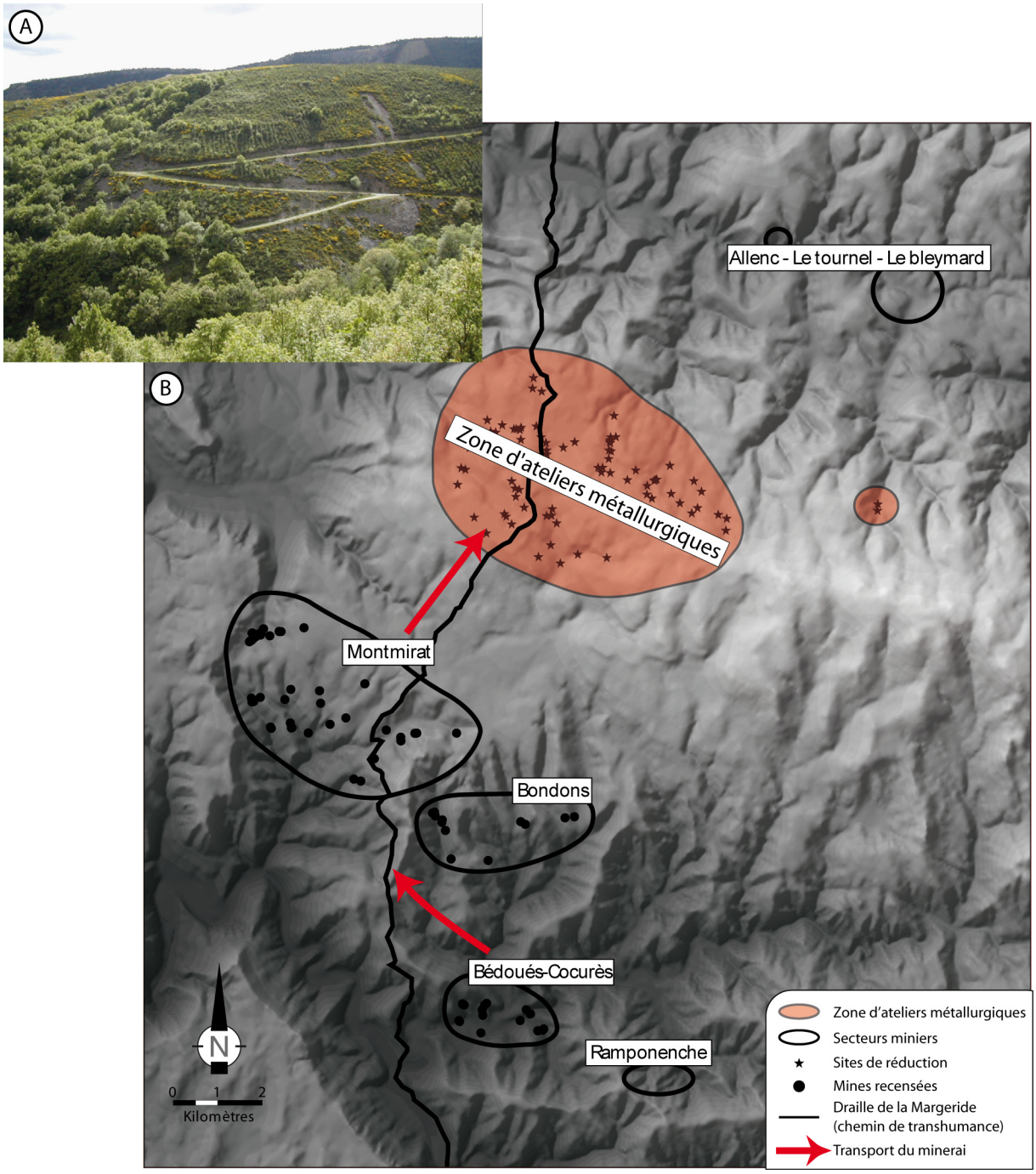


Figure 116 : A) Photographie de haldes de mines (Cliché A. Ploquin) B) Carte de localisation des mines connues autour du secteur de réduction du minerai

Si l'analyse géochimique permet d'identifier les aires d'approvisionnement en minerai en revanche, elle ne permet pas d'expliquer le choix de l'emploi de ce minerai plutôt qu'un autre. En effet, on peut se demander pourquoi les secteurs d'Allenc, le Tournel et le

Bleymard n'ont pas alimenté les fours de réduction alors qu'ils sont plus proche du district de réduction. Pour répondre à ces questions seules une approche historique permettrait d'apporter de nouveaux éclairages.

Une étude de paléopollution a également été réalisée par l'analyse de carottes de tourbe prélevées à proximité du site 3. Les résultats obtenus mettent en évidence une pollution au plomb dans la tourbière des Narses Mortes pour les niveaux datant de l'époque médiévale, mais on constate également une pollution encore plus importante dans les niveaux de datation de l'Age du Fer (de 250 cal. B.C. à 50 cal. B.C.). Jusqu'en 2010, ces traces d'activités métallurgiques anciennes n'étaient pas associées à des vestiges archéologiques. Aujourd'hui une mine gauloise a été identifiée dans le secteur des Bondons par les récents travaux de B. Cauuet (195 cal. B.C. – 45 cal. B.C.) (Cauuet et al., 2010, 2011) et une plateforme de charbonnage a également été retrouvée à proximité des ateliers de réduction (350 cal. B.C. – 60 cal. B.C) (Paradis-Grenouillet et al., 2010). On entrevoit alors une autre phase d'activité métallurgique plus ancienne sur le mont Lozère, cela pourrait être les premiers indices archéologiques de l'exploitation de l'argent par les Gabales (Bailly-Maître, 2011). Il est donc nécessaire de poursuivre les investigations.

1.2.3. L'approvisionnement en combustible contrôle l'implantation des ateliers de réduction

Jusqu'en 2004 les recherches s'étaient centrées sur la question de l'approvisionnement en minerai pour les ateliers de réduction. La découverte de plateformes de charbonnage à proximité des sites d'ateliers a permis de comprendre la raison pour laquelle le minerai était déplacé. La ressource en bois semble imposer ces transferts de matière première.

Cependant, s'il est acquis que l'approvisionnement en charbon de bois est indispensable à la réduction du minerai, on peut se demander pourquoi les métallurgistes le déplacent sur de si longues distances, pourquoi ne pas le réduire directement à la sortie de la mine ?
Lors des prospections minières aucun indice de réduction ou encore de charbonnage n'a été repéré à proximité des zones d'extraction. Les espaces situés à proximité des mines étaient-ils dépourvus de forêt ou bien celles-ci étaient-elles destinées à d'autres usages ? D'après les travaux conduits dans les Alpes et notamment dans la vallée de la Haute Durance, les forêts situées à proximité des mines seraient destinées à approvisionner en bois les mines, pour étayer les galeries ou encore pour abattre la roche par le feu ; ces auteurs parlent alors

de « forêts minières » (Py, 2009 ; Ancel *et al.*, 2011). Qu'en est-il sur le territoire du mont Lozère. Existait-il une « forêt minière » et une « forêt métallurgique » ? Pour répondre à cette question, il serait intéressant d'accéder à quelques documents écrits, s'ils existent sur ce sujet.

Le choix de déplacer le minerai plutôt que le charbon de bois peut s'expliquer à travers le rendement de four de réduction. En effet, des évaluations des proportions volumiques de minerai et de charbon de bois apportent un élément de réponse.
Les textes décrivant la métallurgie du plomb argentifère sont rares (Agricola, 1556 ; Biringuccio, 1572) et ne mentionnent pas réellement les ratios employés entre les quantités de minerai de plomb argentifère et charbon de bois. L'absence de source oblige à proposer une évaluation à partir des connaissances techniques, mais également en utilisant des référentiels expérimentaux (Ploquin *et al.*, 2007) (figure 117). D'après les évaluations faites par A. Ploquin et Ph. Allée, il faudrait donc, pour un volume de galène, entre 15 et 100 volumes identiques de charbon de bois. De telles quantités nécessiteraient de nombreux déplacements, impliquant des coûts très importants (Allée et Paradis, 2007 ; Allée *et al.* 2011).

	Minerais	Charbon de bois
Densité	3,5 à 7	0,2 à 0,4
Masse	1 tonne	2 à 3 tonnes
Volume	0,15 à 0,3 m^3	5 à 15 m^3
Proportion volumétrique	1	15 à 100

Figure 117 : Proposition d'estimation d'un rapport entre volume de minerai et volume de charbon nécessaire pour procéder à la réduction du minerai de plomb argentifère (d'après Allée *et al.*, 2011)

Il était donc préférable de déplacer le minerai ; ces transports pouvaient en outre être simplifiés en utilisant la « grande draille de la Margeride », voie de communication importante empruntée par les troupeaux ovins lors des transhumances ou encore par les marchands. La draille traverse les districts miniers des Bondons et de Montmirat puis passe dans le secteur ouest de la zone de réduction (Allée et al., 2011).

Le déplacement du minerai sur plus de 10 km pour s'approcher de la ressource en combustible est révélateur de l'importance de la réduction du minerai de plomb argentifère sur le plan économique. Le nombre d'ateliers de réduction et les vastes épandages de

scories témoignent d'une activité métallurgique importante sur le mont Lozère. Les quantités de bois prélevées pendant cinq siècles dans les massifs forestiers devaient alors être considérables. On peut se demander comment cette forêt était organisée et gérée pour fournir le combustible nécessaire à la réduction du minerai.

Nos travaux se sont centrés sur l'histoire de cette « forêt métallurgique » médiévale du mont Lozère. Prospection des plateformes de charbonnage, analyses anthracologiques et dendro-anthracologiques et datation au carbone 14 de quelques plateformes de charbonnage apportent aujourd'hui des éléments de réponses sur la physionomie de ces espaces boisés et sur la façon dont les métallurgistes l'exploitaient.

2. Retrouver l'étendue de la « forêt métallurgique » médiévale du mont Lozère

La découverte de quelques plateformes de charbonnage à proximité des sites de réduction, en 2005 par Ph. Allée, permet d'ouvrir un autre axe, une nouvelle thématique au sein du Programme Collectif de Recherches. De nouvelles campagnes de prospections sont alors réalisées, cette fois-ci véritablement centrées sur la recherche des indices de charbonnage pour conduire une étude détaillée de la forêt charbonnée.

2.1. Prospection et localisation des plateformes

Dans un premier temps, malgré les prospections menées pour retrouver les ateliers, les plateformes de charbonnage n'avaient pas été identifiées. Sans un regard avisé, ces vestiges souvent dégradés passaient inaperçus, considérés seulement comme des anomalies topographiques dans le paysage. C'est donc en prospectant les versants de façon systématique que le recensement des plateformes a été mené.

Ce travail d'inventaire a été réalisé en trois étapes. Dans un premier temps, une prospection extensive a été entreprise aux abords des sites d'ateliers afin de repérer la présence d'éventuelles plateformes. A l'issue de ce premier repérage une prospection intensive a été réalisée, donnant lieu à un quadrillage fin du terrain. Celui-ci s'accompagne de sondages à la tarière pédologique permettant ainsi de vérifier la présence de charbons et d'authentifier la nature des plateformes. Il s'est avéré dans certains cas que l'on identifie des plateformes parfaitement conservées mais lors du sondage à la tarière, aucun charbon n'a été retrouvé. Ces dernières ont alors été localisées et répertoriées comme toutes les autres plateformes mais elles ont été notées comme « charbonnières probables ». Enfin une nouvelle prospection intensive a été réalisée sur les secteurs où aucune charbonnière n'avait encore été identifiée, à proximité des sites à scories, mais également sur les plats sommitaux pour vérifier si cette absence de données était représentative d'une réalité de terrain ou bien si elle s'explique par une absence de prospections (figure 118).

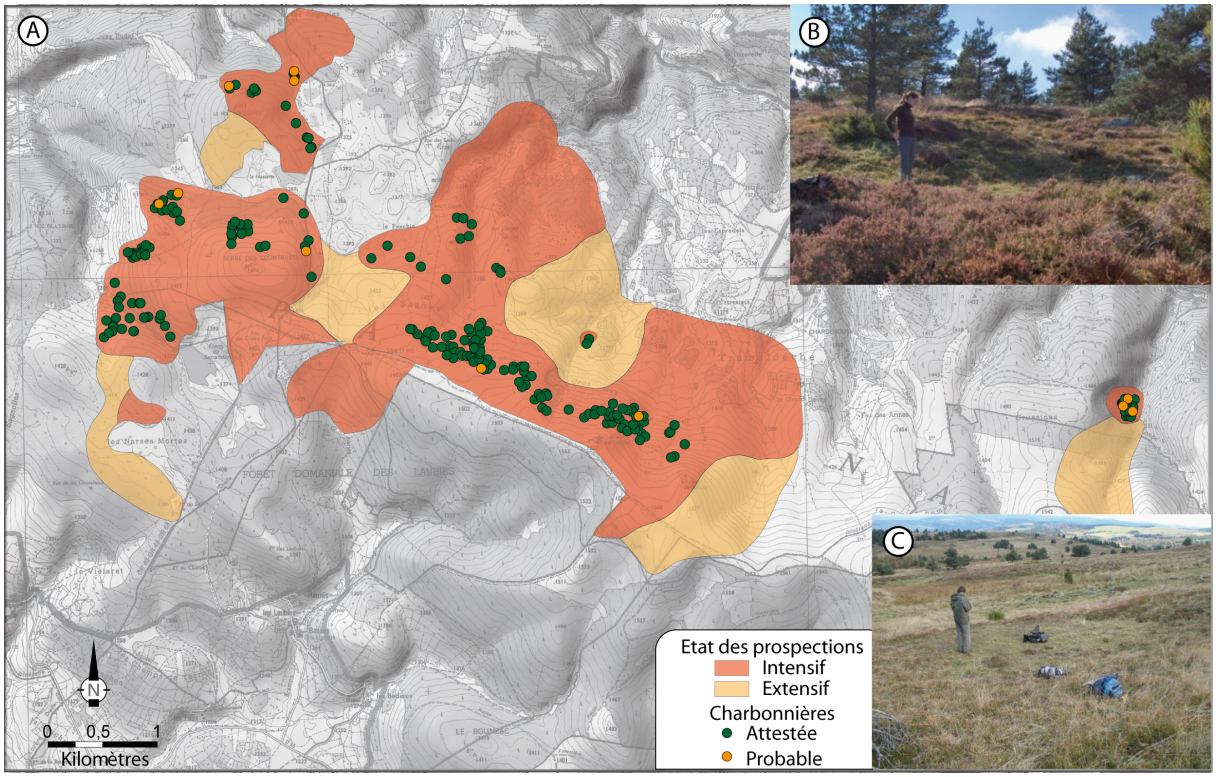


Figure 118 : A) Carte de prospection des plateformes de charbonnage sur la partie ouest du mont Lozère. B et C) Photographies de plateformes de charbonnage (Cliché Paradis-Grenouillet)

A ce jour, 231 plateformes ont pu être localisées dont 211 sont attestées et 20 probables (figure 118). Chaque plateforme de charbonnage a fait l'objet d'une localisation précise au GPS et d'un relevé exhaustif de ses dimensions et de la végétation environnante. Tous les renseignements ont été saisis dans une base de données réalisée sous Access, à l'image du formulaire présenté au chapitre 3.

A l'issue des prospections on constate une dissymétrie entre le versant nord et le versant sud (figure 118). Ce déséquilibre, déjà observé lors du recensement des ateliers de réduction, est accentué pour les plateformes de charbonnage.

En effet le versant sud présente un nombre de sites et de plateformes de charbonnage bien inférieur au versant nord. La question de la représentativité de cette répartition doit être posée. S'agit-il d'une réalité dans les implantations des activités métallurgiques et de charbonnage ou bien est-ce le résultat de biais taphonomiques ? Deux hypothèses peuvent être proposées (Allée *et al.*, 2011).

La première hypothèse attribue ces disparités à des problèmes de conservation des sites. En effet, les versants sud ont fait l'objet dans les années 1970 de reboisement. Des forêts de résineux denses sont quasiment impénétrables empêchant ainsi la prospection. De plus, lors de ces travaux forestiers, d'importants sous-solages ont complètement détruit les sites archéologiques. A l'occasion de quelques trouées, nous avons pu y réaliser des prospections mais retrouver des charbonnières sur ces secteurs semble plus qu'improbable, les structures étant particulièrement fragiles. Sur le versant nord au contraire, ces vastes espaces ouverts, territoires dédiés à l'élevage bovin et ovin permettent des prospections pédestres.

La seconde hypothèse est plutôt basée sur le contexte historique. Il est important de ne pas écarter les droits de charbonnage ; les charbonniers n'avaient peut être accès qu'à une partie du territoire. Pour vérifier cette hypothèse une étude des sources écrites est incontournable.
Enfin on peut également envisager l'absence de forêt sur les versants sud à l'époque des activités de réduction.
Si aucune hypothèse ne peut être écartée, la première hypothèse semble être la plus vraisemblable pour expliquer cette dissymétrie entre les versants nord et sud. En effet, la présence de sites sur le versant sud est probablement un indicateur de forêts, les sites s'implantant au plus près de la ressource en combustible.

2.2. Les activités de charbonnage contemporaines des ateliers de réduction

Sur l'ensemble du secteur métallurgique, 40 datations ont été réalisées, 13 sur les sites à scories et 27 sur les plateformes de charbonnage. Les résultats obtenus montrent une très bonne correspondance entre les activités métallurgiques et celle du charbonnage (figure 119). Seule une charbonnière est datée de la période gauloise (Samouse 45).

A travers ces datations on observe bien une complémentarité des pratiques de charbonnage et des activités métallurgiques. En effet, les premiers ateliers datés coïncident bien aux charbonnières les plus anciennes et le site le plus récent (site 62) correspond bien aux charbonnières les plus récentes (Crussinas 2, Bourrassade 22 ou encore Countrasts 2).

Cela renforce alors l'idée d'une exploitation de la forêt pour les activités métallurgiques. Si la forêt, présente sur le mont Lozère, était charbonnée pour d'autres usages on peut alors penser retrouver des plateformes plus anciennes ou au contraire plus récentes et complètement déconnectées de la période de réduction du plomb argentifère.

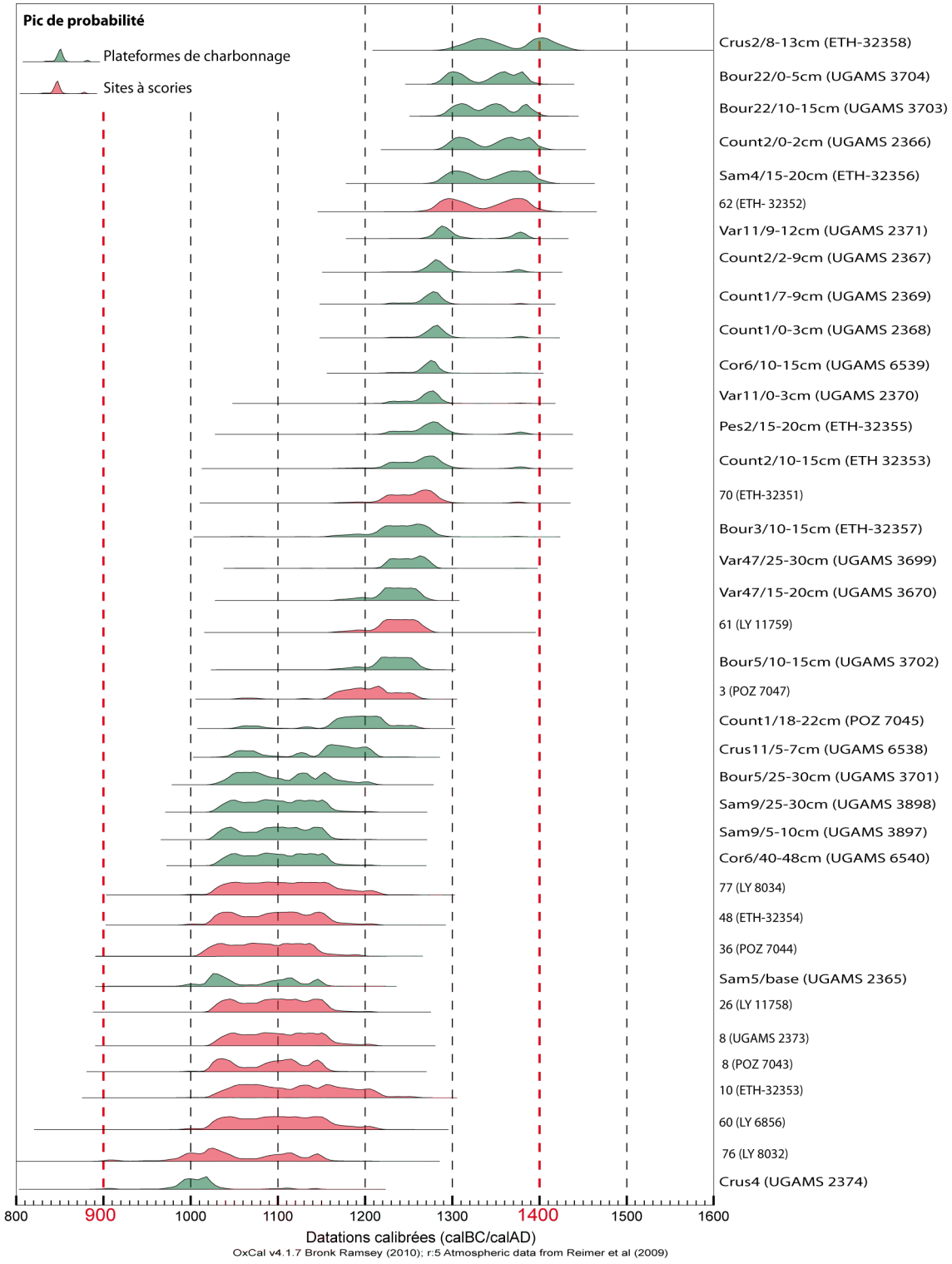


Figure 119 : Ensemble des datations réalisées sur les ateliers de réduction (en rouge) et sur les plateformes de charbonnage (en vert) classées de la date la plus ancienne vers la plus récente

Pour comprendre les dynamiques des activités métallurgiques et de charbonnage à l'échelle du massif du mont Lozère, les datations ont également été réalisées en suivant une logique spatiale. Les résultats obtenus révèlent une répartition homogène des datations sur l'ensemble du massif. On n'observe pas de différence de datation entre l'est et l'ouest ni entre le versant nord et le versant sud. Le secteur du mont Lozère semble donc avoir fait l'objet d'une occupation métallurgique continue sur cinq siècles d'activité. On n'identifie pas de front pionnier progressant au cours du temps d'est en ouest ou d'ouest en est, cela apporte déjà quelques éléments de réponse sur le mode d'exploitation de cette forêt métallurgique.

A travers les trente-huit dates médiévales, on peut identifier une périodisation des activités (figure 119). En effet, une fois les dates classées par ordre croissant on peut observer un nombre de sites plus important dans les périodes les plus anciennes entre le XIe et le XIIIe siècle, alors que la majorité des plateformes de charbonnage est datée du XIIIe siècle au XVe siècle. Ces résultats posent plusieurs questions. La métallurgie du plomb argentifère sur le mont Lozère a-t-elle connu une période d'activité plus importante entre le XIe et le XIIIe siècle ou est-ce un biais d'échantillonnage ?

A travers les recherches historiques conduites par M.C. Bailly-Maître on sait que le Moyen Age est une période importante dans l'expansion de la métallurgie du plomb argentifère. Le plomb entre dans la composition de nombreux objets et l'argent est sujet à convoitise car il est étroitement lié au monnayage (Bailly-Maître et Poisson, 2007 ; Bailly-Maître, 2011). La période du Xe au XIVe siècle connaît un accroissement démographique, une évolution des techniques agraires et artisanales conduisant dès lors à une plus forte demande en production métallique. Les ateliers de réduction du mont Lozère semblent se développer dans cette dynamique sociétale. Le déplacement du minerai sur plus de 10 km pour venir le réduire sur les versants du mont Lozère est un témoignage de l'importance de la production du plomb argentifère ; des moyens considérables sont mis en œuvre pour valoriser les ressources naturelles. Mais pour mieux comprendre cette organisation du territoire, le développement de ces ateliers sur cinq siècles d'activités, il est nécessaire de poursuivre les recherches historiques. Les récents travaux de N. Minvielle aux archives apportent de nouveaux éclairages avec notamment quelques mentions de charbonnage sur le mont Lozère, d'extractions minières au sud ouest de cette région, des actes des propriétés minières

permettront de comprendre les enjeux socio-économiques de cette activité métallurgique (com pers N. Minvielle).

A la lecture des datations (figure 119) on remarque également qu'un grand nombre de plateformes de charbonnage est daté des phases les plus récentes XIIIe – XIVe siècle. Ce décalage entre la phase la plus intense de réduction du minerai et celle de charbonnage, peut s'expliquer par des phénomènes de réemploi des plateformes. Nous l'avons vu dans le chapitre 3, la datation des plateformes de charbonnage peut parfois être problématique.

Les phénomènes de remaniement de la terre charbonneuse pour construire les meules suivantes, le nettoyage des plateformes peuvent conduire à effacer progressivement les phases de charbonnage les plus anciennes. Il est donc envisageable que sur ces cinq siècles d'activité les charbonniers aient employé à de nombreuses reprises les plateformes, effaçant progressivement le charbonnage datant du XIe siècle.

Pour tenter de dater les phases de charbonnage les plus anciennes, nous avions choisi de dater des charbons provenant des prélèvements de profondeur. Puis afin de vérifier si la diachronie est conservée sur chaque plateforme, nous avons également réalisé une datation sur des charbons provenant des prélèvements de surface. Cependant, pour cette étude nous recherchions des échantillons présentant un nombre important de charbons afin de mener une étude du diamètre des bois charbonnés. Or, il s'avère souvent que les horizons de surface et de profondeur présentent des échantillons plus pauvres en charbons. Les niveaux intermédiaires ont alors été analysés et datés. Ce choix peut-il conduire à retrouver uniquement les phases de charbonnage les plus récentes ?

Deux plateformes de charbonnage répondent à cette question. En effet, les charbonnières Countrasts 1 et Countrasts 2 ont fait l'objet de trois datations. Pour l'analyse du diamètre des bois, seuls les prélèvements de surface et ceux en position intermédiaire contenaient suffisamment de charbon de bois pour conduire une étude du diamètre des bois. Mais les niveaux de profondeur ont également été datés mettant en évidence une certaine diachronie (figure 120).

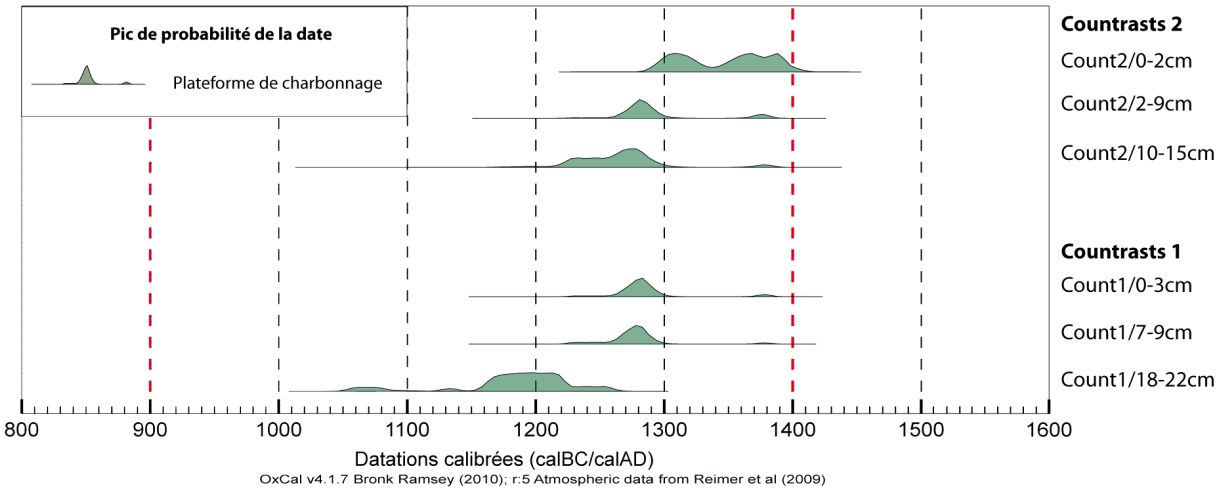


Figure 120 : Exemple de trois datations réalisées sur les charbonnières Countrasts 1 et 2

Ces résultats mettent ici en évidence la conservation des différentes phases de charbonnage, avec une gradation des charbons les plus anciens en profondeur vers les plus récents en surface.

2.3. Organisation du territoire métallurgique à l'époque médiévale

La concordance temporelle des sites d'atelier et des plateformes de charbonnage permet donc d'envisager une approche spatiale, à grande et à petite échelle, pour mieux comprendre l'organisation de ce territoire métallurgique. Dès les premières prospections, une certaine organisation des ateliers de réduction et des plateformes de charbonnage a pu être observée sur les versants (Allée et al. 2006, 2011; Allée et Paradis, 2007).

Les sites sont généralement implantés à la faveur des replats en bas de versant ou bien un peu plus en amont dans le versant sur des petits replats proches des tourbières soligènes typiques des versants du mont Lozère. Cet étagement des sites formant une double rangée n'est pas systématique sur l'ensemble du secteur ; on constate en effet quelques zones pour lesquelles on ne retrouve que les ateliers de réduction en bas de versant ; c'est notamment le cas du secteur de Vareilles à l'est avec le site 21 ou encore du secteur de Corrizo au nord avec les sites 62, 64 et 67 (figure 121).

Au dessus des sites situés en bas de versant on retrouve un nombre important de charbonnières s'étendant sur la totalité du versant. Les secteurs pour lesquels deux rangées de sites ont été constatées présentent des plateformes de charbonnage entre les deux étages de sites mais également au dessus de la deuxième rangée.

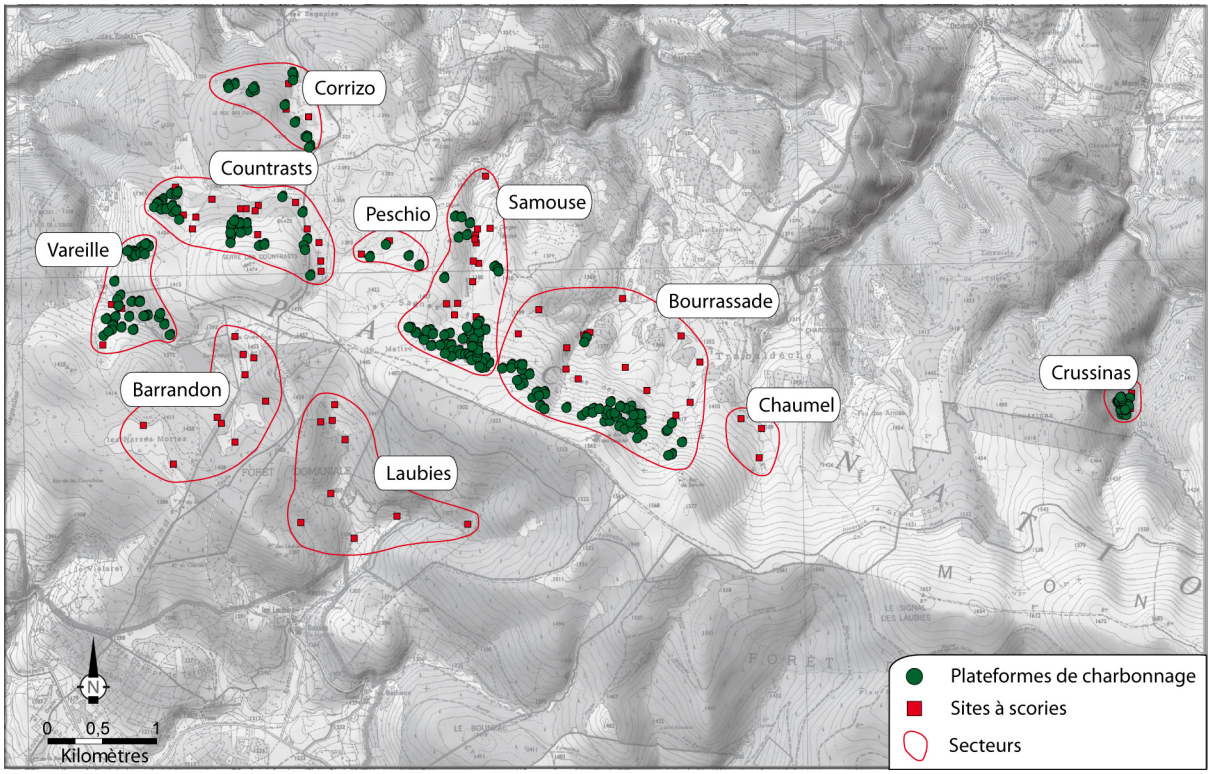


Figure 121 : Carte de localisation de l'ensemble des sites à scories et des plateformes de charbonnage

A partir de l'ensemble de ces données spatiales il est possible de proposer différents modèles d'organisation du territoire métallurgique sur les versants du mont Lozère (Allée et Paradis, 2007 ; Allée *et al.*, 2011) (figure 122).

Le modèle A représente les secteurs de Countrasts et de Vareilles avec des pentes douces et relativement courtes. Les ateliers de réduction sont implantés soit uniquement à la faveur des bas de versant, soit sur deux rangées. Les plateformes de charbonnage se situent alors sur les versants, à l'amont des sites de bas de versant ou bien entre les deux rangées de sites ainsi qu'au dessus de la deuxième rangée de sites.

Le modèle B, quant à lui, est révélateur de l'organisation des sites sur les secteurs de Samouse et de Bourrassade, avec deux rangées de sites, et des plateformes de charbonnage bien étalées à l'amont de la deuxième rangée. En effet, les longs versants plus pentus semblent favorables au développement des massifs forestiers charbonnés.

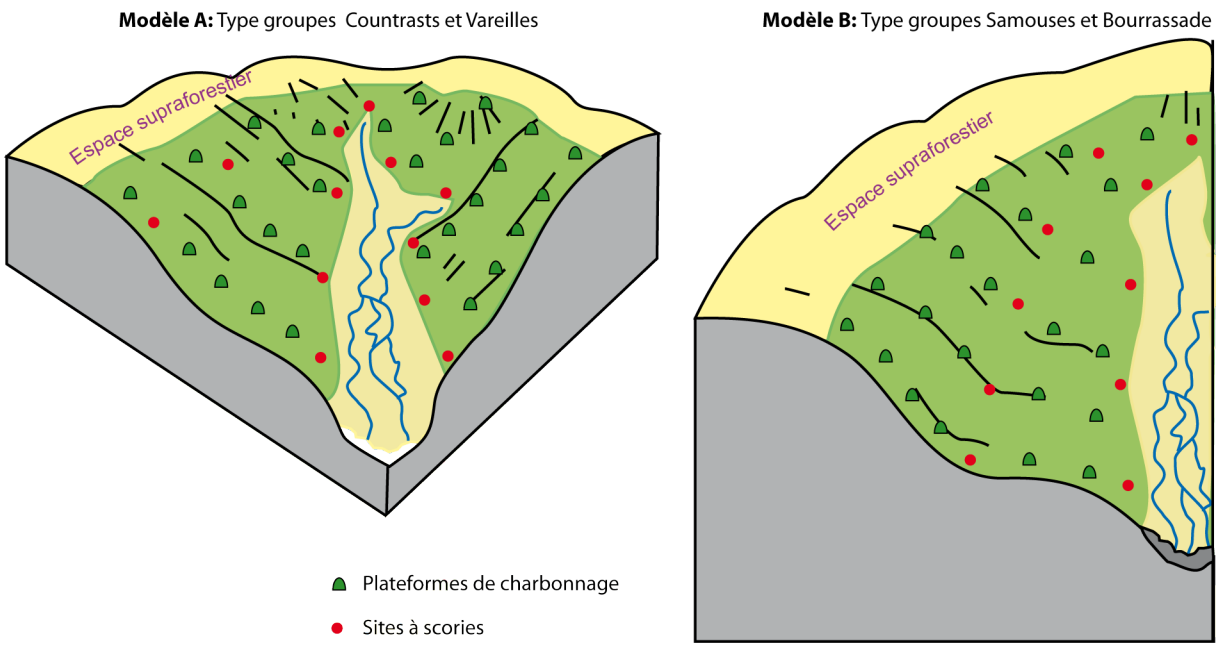


Figure 122 : Modèles d'organisation du territoire métallurgique sur les versants du mont Lozère (Allée et Paradis, 2007 modifié)

A partir de ces deux modèles nous avons pu, dans le cadre de cette étude, travailler plus précisément sur les aires d'approvisionnement, à la fois des métallurgistes pour récolter le charbon de bois, mais également des charbonniers pour couper le bois nécessaire à la construction des meules.

2.3.1. L'aire d'alimentation en charbon de bois pour les ateliers de réduction

La localisation des zones d'ateliers et des plateformes de charbonnage permet d'évaluer les distances d'approvisionnement en combustible pour les ateliers de réduction. En calculant la distance entre les plateformes de charbonnage et les sites d'atelier on constate qu'en fonction de la morphologie des pentes, les aires d'approvisionnement peuvent changer. En effet, sur les secteurs de Countrasts et de Vareilles (Modèle A), là où les pentes sont plus douces, les distances d'approvisionnement sont assez faibles avec environ 10 m entre l'atelier et la plateforme la plus proche et jusqu'à 200 m avec la plateforme la plus éloignée (figure 123).

En revanche, les secteurs présentant des versants plus pentus et plus longs, la distance

entre la charbonnière la plus éloignée et la zone de réduction est beaucoup plus importante ; elle est évaluée à 350 m pour le secteur de Samouse et à près de 600 m pour le secteur de la Bourrassade (Modèle B) (figure 123).

Ⓐ

	Distance minimale	Distance maximale
Vareilles	15 m	195 m
Countrasts	10 m	200 m
Samouse	50 m	350 m
Bourrassade	30 m	600 m

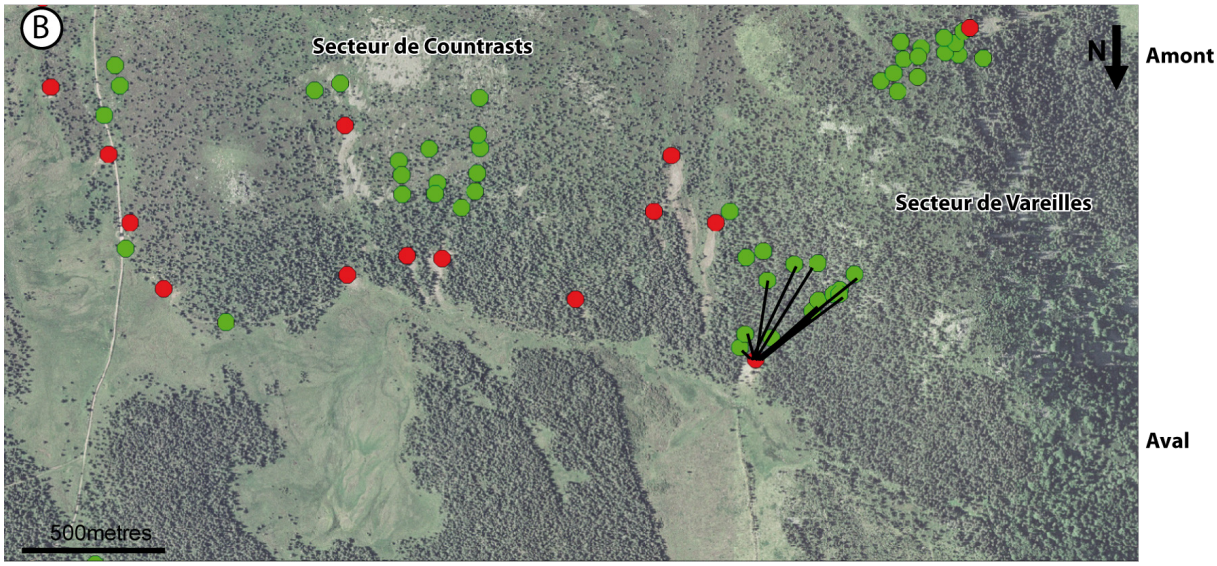


Figure 123 : A) Tableau de distance entre les plateformes de charbonnage et les ateliers de réduction. B) Exemple d'organisation des ateliers et des plateformes de charbonnage sur le secteur de Countrasts

Les secteurs de Samouse et de la Bourrassade offrent des versants plus allongés ce qui favorisent l'implantation d'un grand nombre de plateformes de charbonnage au dessus de la deuxième série d'ateliers. On retrouve des plateformes étagées sur ces versants un peu plus pentus, jusqu'à la rupture de pente avec les plats sommitaux (figure 122 B). Dans ce type de contexte, seules les charbonnières généralement situées au dessus de la seconde série d'ateliers ont été retrouvées. En effet, les zones de bas de versant ont été souvent remaniées, pour l'agriculture par exemple ; on retrouve de nombreux tas de pierres témoignant d'un épierrement des sols.

2.3.2. L'organisation du charbonnage sur les versants

Entre les deux alignements de sites et au-dessus, on retrouve un réseau très dense de plateformes de charbonnage ; il arrive parfois d'entrevoir une sorte de maillage. Bien que toutes les plateformes n'aient pas été retrouvées, sur les secteurs les plus denses on peut envisager de calculer la distance moyenne entre les plateformes afin de définir de manière générale l'aire d'approvisionnement en bois pour une plateforme de charbonnage.

A cet effet, seules les distances entre chaque charbonnière, de proche en proche, ont été mesurées. Lors de cette analyse, trois sortes de distances ont été distinguées :
- a) la distance entre deux plateformes situées sur une même courbe de niveau
- b) la distance entre deux plateformes situées l'une au-dessus de l'autre
- c) la distance en diagonale

Ces mesures ont été réalisées pour les secteurs où la densité des plateformes de charbonnage était suffisamment importante, c'est à dire pour les secteurs de Vareilles, de Countrast, de Samouse et de Bourrassade

Une fois encore des différences entre les secteurs ont été constatées. Les zones de faibles pentes (modèle A) présentent des distances entre les plateformes plus réduites que sur les secteurs aux pentes plus fortes et plus longues (modèle B) (figure 124). En effet, sur le secteur de Vareilles et de Countrasts les distances entre les plateformes, relativement réduites, se situent entre 30 et 70 m environ, alors que le réseau est beaucoup plus lâche sur les secteurs de Samouse et de Bourrassade avec des distances proches de 70 m.

	Distance a	Distance b	Distance c
Vareille	30 m	35 m	40 m
Countrasts	40 m	70 m	80 m
Samouse et Bourrassade	70 m	65 m	70 m

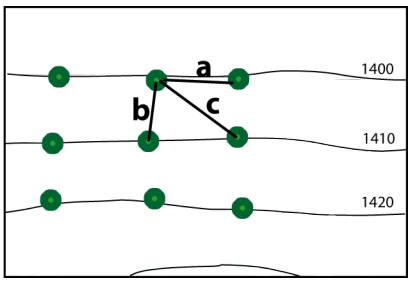


Figure 124 : Tableau récapitulant les distances entre les plateformes de charbonnage

A partir de ces données on peut évaluer l'aire de prélèvement en bois des charbonniers à environ 30 à 40 m de rayon autour de la plateforme pour les secteurs de Vareilles et de Countrasts et à près de 60 m pour les secteurs de Samouse et de Bourrassade.

L'approche spatiale conduite sur ce territoire permet d'imaginer l'ampleur des activités métallurgiques. Même si les 76 ateliers de réduction n'ont pas tous fonctionné en même temps, ces vestiges témoignent d'une activité métallurgique importante et la production de charbonnage devait également être de grande ampleur. Il faut alors imaginer les versants boisés sur lesquels fumaient en même temps plusieurs meules et fours de réduction.

2.4. Reconstruction des anciennes forêts charbonnées

Pour conclure sur cette approche spatiale il est possible de restituer les limites de la « forêt métallurgique » médiévale. A l'image des travaux conduits par Bonhôte (1990) et Davasse (2000) dans les Pyrénées, nous proposons également différentes hypothèses de restitution des anciens espaces boisés du mont Lozère (figure 125).

La localisation des plateformes de charbonnage et des sites d'ateliers permet aujourd'hui de proposer une restitution des limites de la forêt charbonnée médiévale. Sur le versant méridional, les boisements actuels (ONF) rendent les prospections presque impossibles ; aucune reconstitution précise ne peut être tentée, si ce n'est de noter la présence probable de boisements à l'amont immédiat des rares sites d'atelier découverts.

Sur le versant nord, les bonnes conditions de prospection dans les landes et pacages favorisent la qualité de l'inventaire. Sur les bas versants de la Bourrassade et à proximité du village des Sagnes, les prospections extensives puis les vérifications systématiques n'ont pas permis d'identifier d'anciennes plateformes. Cela ne signifie pas obligatoirement l'absence de charbonnage sur ces espaces. En effet, comme nous l'avons déjà évoqué sur ces secteurs, des empierrements non structurés semblent témoigner d'une ancienne activité agricole qui pourrait avoir effacé toute trace d'activité de charbonnage.

Des prospections intensives ont également été réalisées sur les pelouses sommitales. Cette fois, l'absence de plateformes ne peut être expliquée par des activités agricoles postérieures puisqu'aucun signe de travail de la terre n'a pu être identifié. Par conséquent, ces espaces sommitaux seraient des espaces ouverts déjà ouverts à l'époque médiévale. Cela est par ailleurs mis en évidence par les travaux des palynologues (Pulido Avila, 2006 ; Servera-Vives et al., 2010, 2011).

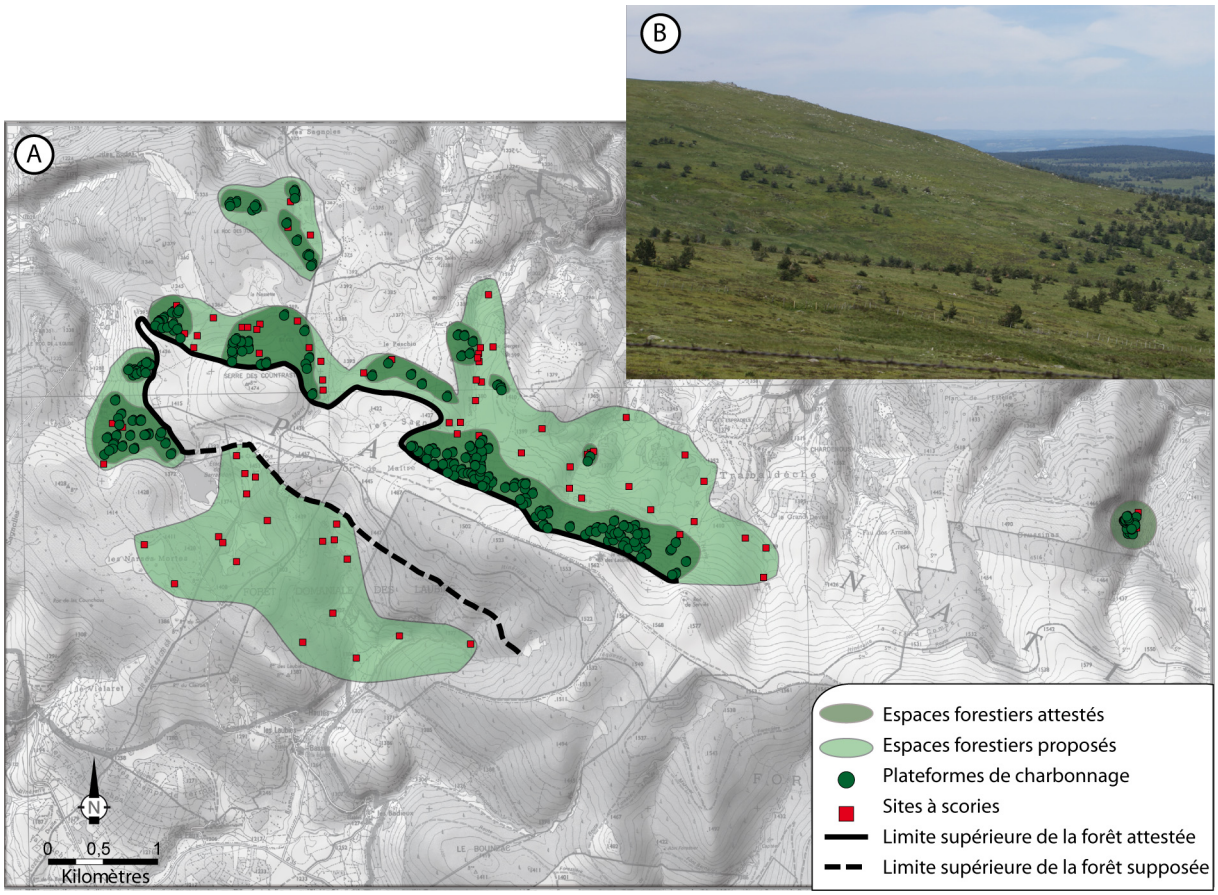


Figure 125 : A) Proposition de restitution des anciens espaces forestiers charbonnés sur le mont Lozère (Allée *et al.*, 2011 modifié), B) Photographie de la rupture de pente entre les versants et le sommet du mont Lozère (cliché S. Paradis-Grenouillet)

Depuis le début des prospections des plateformes de charbonnage, la restitution des espaces forestiers a évolué, s'est affinée (Allée *et al.*, 2006, 2011 ; Allée et Paradis, 2007 2009).

Avec quelques précautions méthodologiques, les plateformes de charbonnage généralement installées au plus près de la ressource en bois (Musset, 1996 ; Davasse, 2000) permettent par leur localisation d'entreprendre une véritable reconstitution paléogéographique des espaces forestiers médiévaux. La carte ainsi dessinée (figure 125) propose, pour le versant septentrional du mont Lozère, deux modèles forestiers différents : des espaces forestiers attestés et des espaces forestiers proposés.

Les massifs forestiers attestés sont restitués avec fiabilité et précision sur les versants où sont répertoriées les plateformes de charbonnage. Les ateliers métallurgiques, étant eux aussi des marqueurs d'une présence forestière à proximité, le même essai de reconstitution des espaces boisés a été réalisé à partir de ces sites. En revanche, ces boisements ont

été considérés comme probables tant que les prospections de terrain n'ont pas permis d'y vérifier l'existence de charbonnières.

Le premier modèle, construit à partir des massifs attestés, présente un boisement résiduel très fragmentaire. Le second modèle offre au contraire la vision d'une large bande forestière quasi-continue, installée sur les versants pentus situés en contrebas de la zone des crêtes, entre 1450-1500 m et 1300 m d'altitude. La limite supérieure de la forêt épouse parfaitement les contraintes du relief. Elle suit la rupture topographique majeure qui sépare versants pentus et espaces plans sommitaux. Située vers 1400 m d'altitude à l'ouest, sur la serre des Countrasts, elle s'élève progressivement vers l'est, atteignant 1500 m sous le Roc des Laubies. Les surfaces sommitales apparaissent alors totalement asylvatiques à l'époque médiévale. Les plateformes situées à la rupture de pente marquent alors la limite supérieure de la forêt. Cette limite n'est pas le reflet d'une impossibilité de la forêt à s'implanter sur les sommets. Elle est le témoignage de la multiplicité de pratiques existantes sur les sommets du mont Lozère. Ces vastes pelouses à nards décelables, à cette époque, sur les diagrammes polliniques (Beaulieu et Pons, 1979 ; Reille, 1990), seraient des espaces ouverts par l'homme pour y développer le pastoralisme.

En effet, dans le cadre du nouveau programme de recherche « Pratiques et mobilités territoriales sur le mont Lozère depuis le Néolithique » (dir Allée), de nouvelles découvertes ont été réalisées mettant ainsi en évidence des activités pastorales importantes sur ce territoire. Les nouvelles données polliniques obtenues dans le cadre de la thèse de G. Servera-Vives mettent en évidence la présence d'espaces pâturés au Moyen Age, visibles par une augmentation des champignons coprophiles dans la tourbière des Countrasts, associés à des forêts de hêtre (Servera-Vives et al. 2010, 2011, à paraître).

Ces données paléoenvironnentales ont récemment été renforcées par la fouille d'un enclos pastoral situé juste au dessus de la limite supérieure de la forêt restituée sur la Serre des Countrasts, ce dernier étant daté du VIIIe siècle (Orengo-Romeu et al., 2011).

Actuellement les recherches tentent de comprendre l'évolution des paysages de ce territoire, de définir depuis quand ces espaces sommitaux sont déboisés. Les récentes recherches en pédo-anthracologie, conduites par M.C. Bal Serin et Ph. Allée permettent de porter un nouveau regard, mettant en évidence notamment un passé boisé des sommets du mont Lozère au Néolithique (Liard et al. 2011 ; Bal-Serin et al., 2011).

3. Anthracologie de la forêt charbonnée à l'époque médiévale

L'approche spatiale menée sur le mont Lozère a permis de restituer les anciens contours de la forêt médiévale et de mieux comprendre l'organisation des activités métallurgiques sur ce territoire. La proximité des ateliers et des plateformes de charbonnage sur les sommets du mont Lozère, alors que les mines sont situées à plus de 10 km, met clairement en évidence le rôle majeur joué par la forêt dans la production du plomb argentifère. Il s'agit bien d'une véritable « forêt métallurgique », destinée à produire du charbon de bois pour alimenter les fours de réduction. On peut s'interroger sur les essences, sur les modes de gestion et révolutions entre les coupes etc. Au regard des paysages aujourd'hui ouverts, on peut même se poser la question de l'impact des activités métallurgiques sur la disparition des massifs forestiers.

Nous l'avons vu dans les chapitres précédents, les plateformes de charbonnage offrent un matériel précieux pour étudier la végétation charbonnée. Les analyses anthracologiques et dendrométriques sur les charbons de bois issus des plateformes de charbonnage apportent aujourd'hui une vision de la physionomie de la forêt charbonnée aussi bien du point de vue de la diversité taxonomique que des choix d'exploitation à travers l'analyse du diamètre des bois.

Ce présent travail dresse une première image de la forêt médiévale. A ce jour, onze plateformes de charbonnage ont été étudiées précisément, dix révélant la végétation charbonnée de l'époque médiévale alors que la onzième restitue une végétation beaucoup plus ancienne datant de l'Age du Fer.

3.1. De la plateforme au laboratoire

Dans le chapitre 3, l'évolution des protocoles de prélèvement pour conduire des analyses archéobotaniques sur les plateformes de charbonnage a été présentée. Les travaux réalisés sur le mont Lozère ont participé à l'évolution de ces protocoles de prélèvement, utilisant dans un premier temps des fouilles extensives des plateformes puis privilégiant les prélèvements sur des fenêtres plus réduites.

Les trois premières plateformes étudiées (Countrasts 1 et 2 et Vareilles 11) ont fait l'objet de sondages assez larges suivant deux tranchées perpendiculaires passant par le centre de la plateforme. Ces coupes avaient pour but d'évaluer si l'on pouvait lire une stratigraphie au sein de l'horizon charbonneux. Sur les trois plateformes fouillées de cette manière, aucune n'a révélé de changements dans les horizons charbonneux qui semblent parfaitement homogènes. Au sein de ces deux transects, neuf fenêtres de prélèvements ont ensuite été échantillonnées pour permettre l'analyse anthracologique. Au sein de chaque fenêtre, des décapages de quelques centimètres (3 ou 5 cm) ont été réalisés afin de bien séparer les charbons provenant du fond de l'horizon charbonneux de ceux de surface.

Compte tenu de l'absence de stratigraphie visible au sein de ces trois plateformes de charbonnage, et du temps nécessaire pour réaliser des prélèvements de cette manière, le protocole d'échantillonnage a été simplifié. Sur une même plateforme, uniquement 2 à 3 fenêtres de prélèvement, mesurant entre 30 et 40 cm de côté, sont ensuite ouvertes pour échantillonner les sédiments par décapages successifs de quelques centimètres d'épaisseur. Pour rappel, B. Davasse procédait à ce genre de prélèvements en choisissant l'emplacement du sondage à la tarière pour évaluer l'endroit le plus épais de l'horizon charbonneux (Davasse, 2000). Dans le cadre de notre étude, la fenêtre de prélèvement a systématiquement été placée à mi-chemin entre le centre de la plateforme et la périphérie comme le préconise L. Fabre (Fabre, 1996). Ce type de prélèvement, beaucoup plus simple à mettre en œuvre, a été appliqué sur le mont Lozère, permettant ainsi d'augmenter le nombre de plateformes de charbonnage prélevées. La taille de la fenêtre de prélèvement a été réévaluée au cas par cas, afin d'obtenir un volume de sédiments suffisamment important et surtout assez riche en charbons pour conduire par la suite une analyse dendro-anthracologique. Par ailleurs, dans la mesure du possible, pour vérifier la richesse des prélèvements en charbons, les sédiments ont été directement tamisés sur le terrain à la maille de 2 mm.

Nous souhaitions certes étudier l'image de la forêt charbonnée à l'époque médiévale sur l'ensemble du territoire, mais en focalisant également notre regard à l'échelle des versants ou encore des districts métallurgiques. On peut en effet se demander si le massif forestier du mont Lozère est géré de façon homogène, si certains secteurs sont plus exploités conduisant ainsi à des forêts dégradées. La réciproque est tout aussi valable. Existe-t-il des secteurs moins exploités où l'on pourrait retrouver des bois de plus gros diamètres ?

Il semblait par ailleurs intéressant d'évaluer si le gradient altitudinal, certes peu important sur le mont Lozère, pouvait influencer la composition des essences charbonnées. Retrouve-t-on une plus grande diversité à proximité des cours d'eau ou des tourbières ?

A ce jour, près de trente plateformes ont été prélevées sur l'ensemble des secteurs prospectés, en choisissant généralement une plateforme en bas de versant et une en haut de versant, mais tenant compte également l'emplacement de la plateforme par rapport au massif forestier restitué précédemment. Sur l'ensemble des plateformes échantillonnées, onze ont été analysées pour définir les espèces charbonnées et la composition en diamètres. Celles-ci se répartissent de façon homogène sur l'ensemble des secteurs.

Tous les échantillons ont été tamisés à l'eau, par flottation, afin de bien séparer la fraction sableuse, relativement abondante dans les prélèvements, des charbons de bois. Tamisés à 4 et 2 mm, les charbons sont ensuite séchés avant l'analyse afin d'éviter la fragmentation des charbons rendus plus fragiles lors du tamisage à l'eau.

Pour réaliser l'analyse dendro-anthracologique sur ces échantillons, deux niveaux de prélèvements ont systématiquement été étudiés par charbonnière ; ceux de surface et ceux de profondeur. Mais comme cela a déjà été expliqué, compte tenu d'une richesse en charbons plus faible pour ces niveaux, les niveaux intermédiaires ont souvent dû être choisis.

Pour chaque niveau étudié, nous avons procédé à l'identification taxonomique et à la mesure du rayon de courbure en vue d'une restitution la plus précise possible de l'image de la forêt charbonnée. Pour cela, chaque charbon a dans un premier temps été mesuré suivant les trois plans de coupe afin d'en calculer un volume moyen. Le charbon a ensuite été coupé pour obtenir une cassure fraîche au niveau de la coupe transversale pour permettre la mesure du rayon de courbure grâce à l'application « AnthracoLoJ ». Une fois la mesure du rayon de courbure réalisée, le charbon de bois peut alors être déterminé en utilisant les deux autres plans de coupe. Dans le cadre de notre travail les manipulations ont été grandement simplifiées par l'utilisation d'un macroscope (Nikon AZ 100), permettant de travailler dans un premier temps à très faible grossissement (de x 1 à x 80) pour réaliser la mesure du rayon de courbure, puis en changeant d'objectif nous pouvons ensuite effectuer la détermination taxonomique à l'aide de plus importants grossissements (x 200 et x 500).

L'ensemble des données obtenues par l'analyse dendro-anthracologique a ensuite été traité en employant les protocoles mis en place à l'issue de l'approche expérimentale présentée dans les chapitres 4 et 5.

3.2. Le charbonnage de la hêtraie à l'époque médiévale

L'analyse anthracologique conduite sur les ateliers de réduction, réalisée par Ph. Allée (Allée, 2004) et sur les plateformes de charbonnage datées de la période médiévale restitue ainsi une première image de la « forêt métallurgique » du mont Lozère. Les prélèvements bien répartis sur l'ensemble du massif, et prenant en compte le gradient altitudinal, semblent apporter une image représentative de la zone d'étude (figure 126).

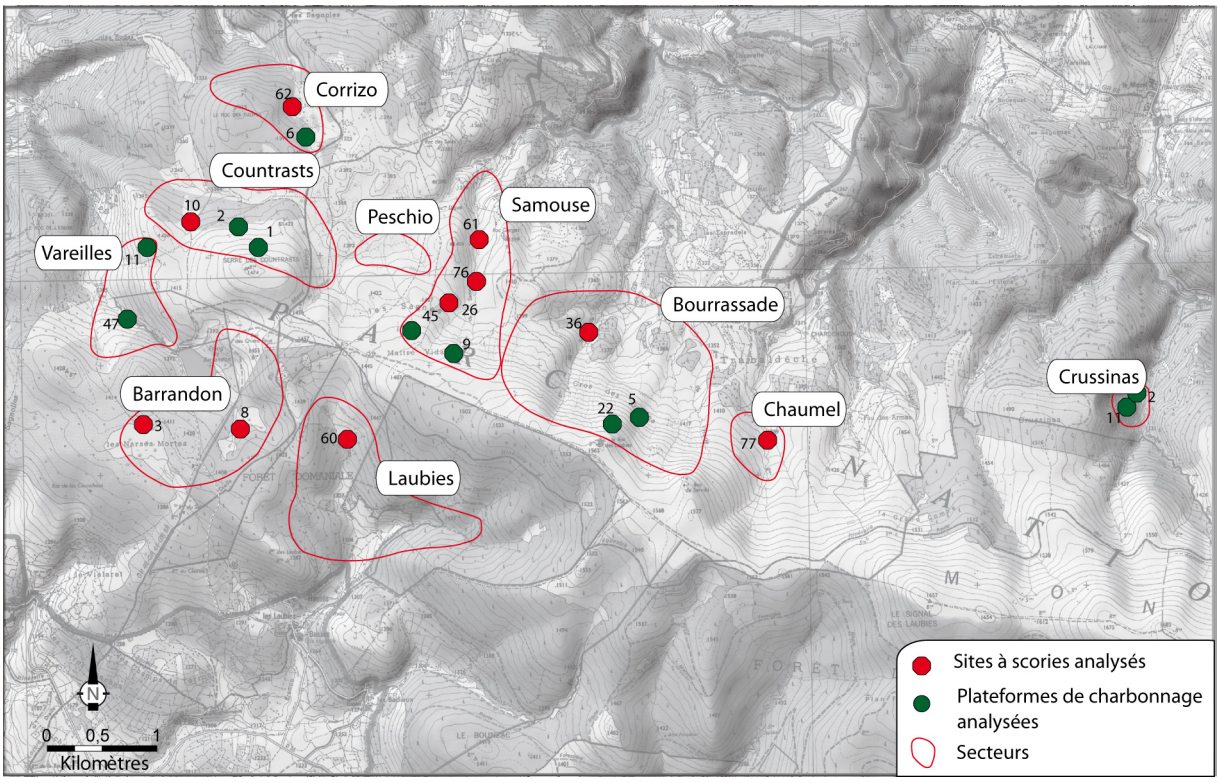


Figure 126 : Carte de localisation des plateformes de charbonnage et des sites à scories pour lesquels une analyse dendro-anthracologique a été réalisée

A ce jour, dix sites à scories (sites 3, 8, 10, 26, 36, 60, 61, 62, 76, 77) et dix charbonnières médiévales (Vareilles 11 et 47, Countrasts 1 et 2, Corrizo 6, Samouse 9, Bourrassade 5 et 22, Crussinas 2 et 11) ont fait l'objet de détermination taxonomique. Les résultats obtenus révèlent une très forte homogénéité spécifique. En effet, l'ensemble des assemblages

présente une quasi-exclusivité de hêtre. Pour seize d'entre eux, le hêtre est même la seule espèce présente. On peut se demander si la quasi-exclusivité du hêtre dans les assemblages est révélatrice de l'image de la forêt ou si elle résulte d'une sélection de cette essence par les charbonniers pour produire du charbon de hêtre, réputé comme ayant un très bon pouvoir calorifique pour la réduction du minerai.

D'après les travaux réalisés en palynologie sur ce secteur (Beaulieu et Pons, 1979 ; Reille, 1990 ; Pulido Avila, 2006 ; Servera-Vives et al., 2010, 2011), les proportions de pollen de hêtre retrouvées pour la période médiévale permettent d'attester de la présence d'une forêt de hêtre sur le massif du mont Lozère. Ces études proposent pour ces périodes des paysages déjà bien ouverts avec la présence de massifs forestiers essentiellement composés de hêtre.

Quatre lots de charbons présentent une diversité qui reste toutefois relative. En effet, la diversité n'est en réalité qu'une apparition de quelques fragments de charbons d'autres essences. En l'occurrence le site 77 présente uniquement 3 % de saule, la charbonnière Vareilles 11 un peu plus de 1 % de chêne sur l'horizon de surface, la charbonnière Corrizo 6, 1 % de bouleau dans l'horizon supérieur et 1 % de noisetier dans l'horizon de profondeur. Enfin, la charbonnière Crussinas 2 ayant fait l'objet uniquement d'une analyse très ponctuelle (moins de 20 charbons) a révélé la présence de sapin en proportion non négligeable. L'apparition d'essence secondaire est-elle représentative d'une station plus diversifiée ?

En ce qui concerne le site 77, il s'agit de charbons retrouvés dans des colluvionnements, la question de la représentativité de ce spectre peut alors être posée. En revanche, pour les charbonnières, cette diversité semblerait s'expliquer soit par un effet de station, soit par un apport des charbonniers.

Pour la charbonnière Corrizo 6, la proximité d'une tourbière pourrait expliquer la présence du bouleau et du noisetier sur cet espace ouvert. Les charbonniers pourraient avoir coupé quelques bois provenant de la bordure de la tourbière.

La présence de chêne à plus de 1400 m d'altitude est moins évidente à expliquer. Cette essence se trouve généralement dans les vallées ou sur les versants de plus basse

altitude. Les deux fragments retrouvés dans la charbonnière Vareilles 11 peuvent s'expliquer par un apport de chêne par les charbonniers, mais compte tenu de l'importance du hêtre dans l'assemblage, cette information est négligeable pour restituer l'image de la forêt charbonnée.

Bien que le corpus de charbons déterminés soit encore trop faible pour la charbonnière Crussinas 2, les premiers résultats sont intéressants à développer ici. En effet, la présence de sapin associé à des charbons de hêtre datés également de l'époque médiévale atteste de la présence d'une hêtraie sapinière, alors que dans cette partie du mont Lozère des travaux de palynologie avaient mis en évidence la disparition de ce type de peuplement dès la période romaine (Beaulieu et Pons, 1979 ; Reille, 1990). Ces résultats encore très fragmentaires semblent indiquer la présence de reliques de hêtraie sapinière à l'époque médiévale sur cette partie du mont Lozère. Les recherches paléoenvironnementales conduites par Ph. Allée dans la partie orientale du massif du mont Lozère ont montré la persistance du sapin jusque dans les Temps modernes (Allée, 2003). On peut alors se demander pourquoi on ne retrouve le sapin que sur un seul assemblage. Est-ce lié au choix des échantillons, ou est-ce une réalité paléoécologique ? A-t-il été évincé par les activités métallurgiques charbonnant ces espaces forestiers ? Le sapin repoussant mal à partir de souche rentre alors en compétition écologiques avec les jeunes pousses de hêtre.

La quasi monospécificité de cette forêt charbonnée médiévale soulève plusieurs questions. Les charbons de hêtre retrouvés sur les sites à scories et les plateformes de charbonnage sont-ils issus d'une sélection par les charbonniers, ou représentent-ils vraiment la végétation du mont Lozère ? Le charbonnage d'une même forêt pendant des siècles, peut-il avoir conduit à sélectionner une essence ? Ces forêts fortement gérées ont pu fait l'objet de coupes des essences secondaires pour laisser plus de place à l'essence dominante afin que celle-ci puisse s'épanouir au mieux.

Il est nécessaire de poursuivre les analyses anthracologiques pour appréhender plus finement l'histoire de cette « forêt métallurgique » médiévale.

3.3. Une gestion durable des taillis de hêtre

Ces assemblages dominés par le hêtre ont permis de réaliser une étude du diamètre des bois. Pour chaque plateforme, deux niveaux ont été systématiquement étudiés, et pour chaque niveau une centaine de charbons a été étudiée permettant ainsi la mesure du rayon de courbure de plus d'une soixantaine de charbons.

Huit plateformes de charbonnage ont fait l'objet d'une étude détaillée du diamètre des bois (Vareilles 11 et 47, Countrasts 1 et 2, Corrizo 6, Samouse 9, Bourrassade 5 et 22, Crussinas 11) (figure 126) (annexe 23 à 30).

L'ensemble des rayons de courbure mesurés a été corrigé par un ajout de + 26 %, (facteur correctifs présenté au chapitre 4). Les résultats obtenus ont été comparés aux soixante et une simulations ainsi qu'au résultat obtenu lors de l'approche expérimentale sur le taillis de châtaignier à l'aide de l'Analyse Factorielle Discriminante (figure 127).

A l'issue de cette analyse on observe que l'ensemble des données archéologiques s'associe aux groupes 2 et 3 (figure 127). Sachant que le groupe 2 des simulations représente essentiellement des mélanges de « très petits bois » (0-2 cm de diamètres), de « petits bois » (2-5 cm de diamètres) et de « bois moyens » (5-10 cm de diamètre), et que le groupe 3 correspond globalement à un ajout de « gros bois » (10-18 cm de diamètre), les assemblages archéologiques obtenus témoignent d'une exploitation de bois compris globalement entre 2 et 18 cm de diamètre.

Il convient alors de rechercher la ou les simulations s'approchant le plus des histogrammes obtenus sur les seize niveaux étudiés des charbonnières archéologiques (annexe 23 à 30).

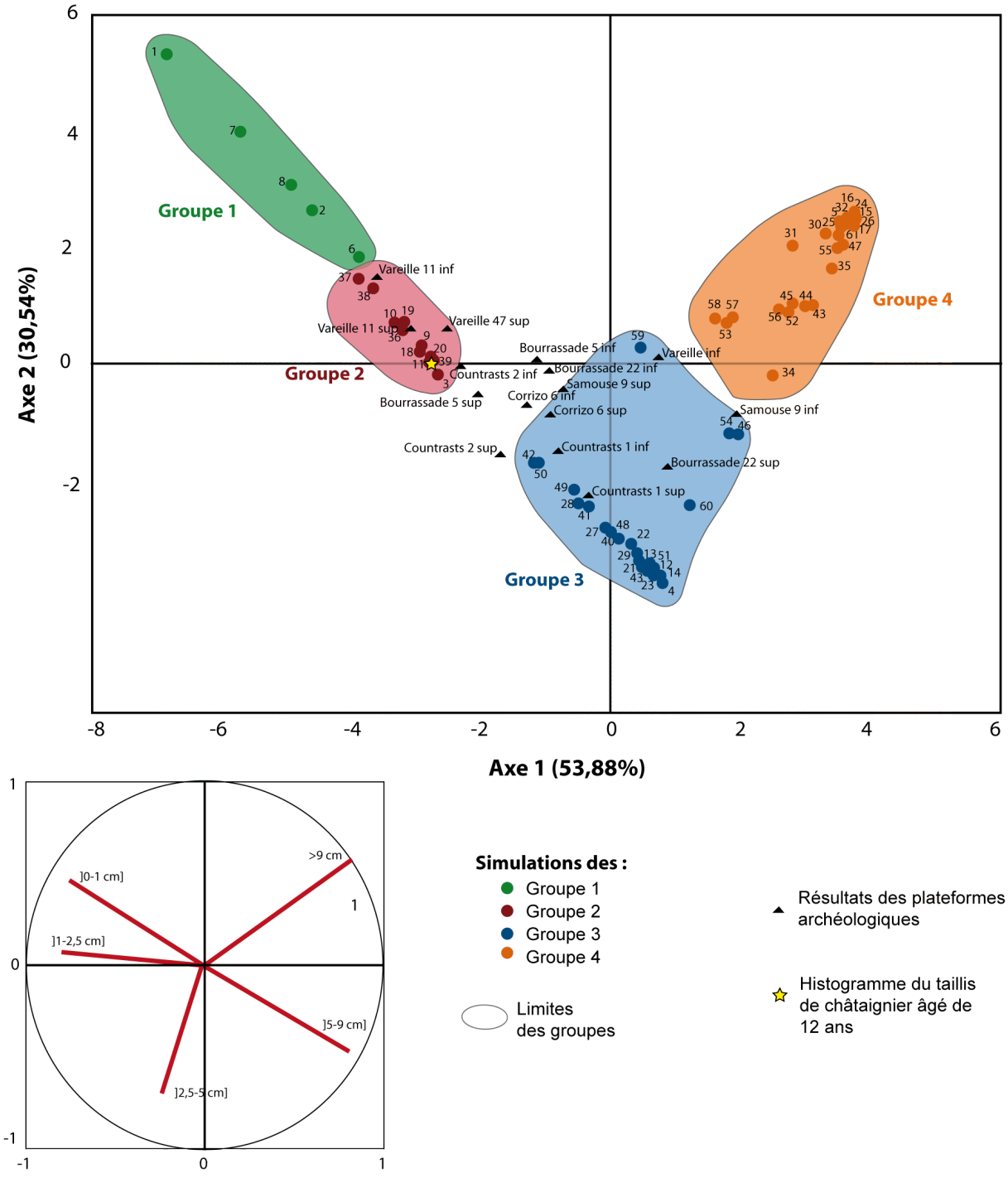


Figure 127 : Résultats de l'Analyse Factorielle Discriminante, comparant les données archéologiques aux simulations et au résultat obtenu sur le taillis de châtaignier

3.3.1. L'utilisation d'un mélange de « petits bois », de « bois moyens » et de « gros bois »

a) Dix niveaux présentant une majorité de « bois moyens »

Sur les seize niveaux étudiés, dix présentent une dominance de « petits bois » et de « bois moyens » avec la présence de « gros bois » mais en plus faible proportion :

- Countrasts 1 niveaux inférieur et supérieur (annexe 25)
- Countrast 2 niveaux inférieur et supérieur (annexe 26)
- Corrizo 6 niveaux inférieur et supérieur (annexe 27)
- Samouse 9 niveau supérieur (annexe 28)
- Bourrassade 5 niveaux inférieur et supérieur (annexe 29)
- Bourrassade 22 niveau inférieur (annexe 30)

Prenons l'exemple des deux niveaux étudiés de la charbonnière Countrasts 1 et le niveau de surface de la charbonnière Samouse 9. Ces trois niveaux présentent tous une dominance de bois compris entre 5 et 10 cm (figure 128 A, et B).

Les histogrammes obtenus par l'analyse dendro-anthracologique présentent tous une forme en cloche des proportions plus importante dans la classe de rayons]2,5-5 cm]. A l'issue de l'Analyse Factorielle Discriminante les histogrammes obtenus sur ces trois niveaux sont associé au groupe 3 des simulations. Nous avons pu ainsi visuellement choisir la simulation s'approchant le plus des proportions obtenues par classe de rayons à partir de l'analyse des charbons de bois. En ce qui concerne la charbonnière Countrasts 1, la simulation 28 s'approche le plus du niveau de surface en revanche pour le niveau de profondeur le choix est plus compliqué et ce sont les simulations 42 et 50 qui ont été choisies (figure 128 A). Pour le niveau de surface de la charbonnière Samouse 9 c'est la simulation 59 qui s'approche le plus des données dendro-anthracologiques (figure 128 B). Bien que les simulations proposées diffèrent légèrement les unes des autres, on remarque que toute restituent un emploi en majorité de « bois moyens » avec un ajout de « gros bois ». Ajouté à ces deux catégories de diamètres dominantes, on retrouve, selon les niveaux et les charbonnières, quelques petites différences avec une utilisation soit de plus petits bois ou au contraire de plus gros bois.

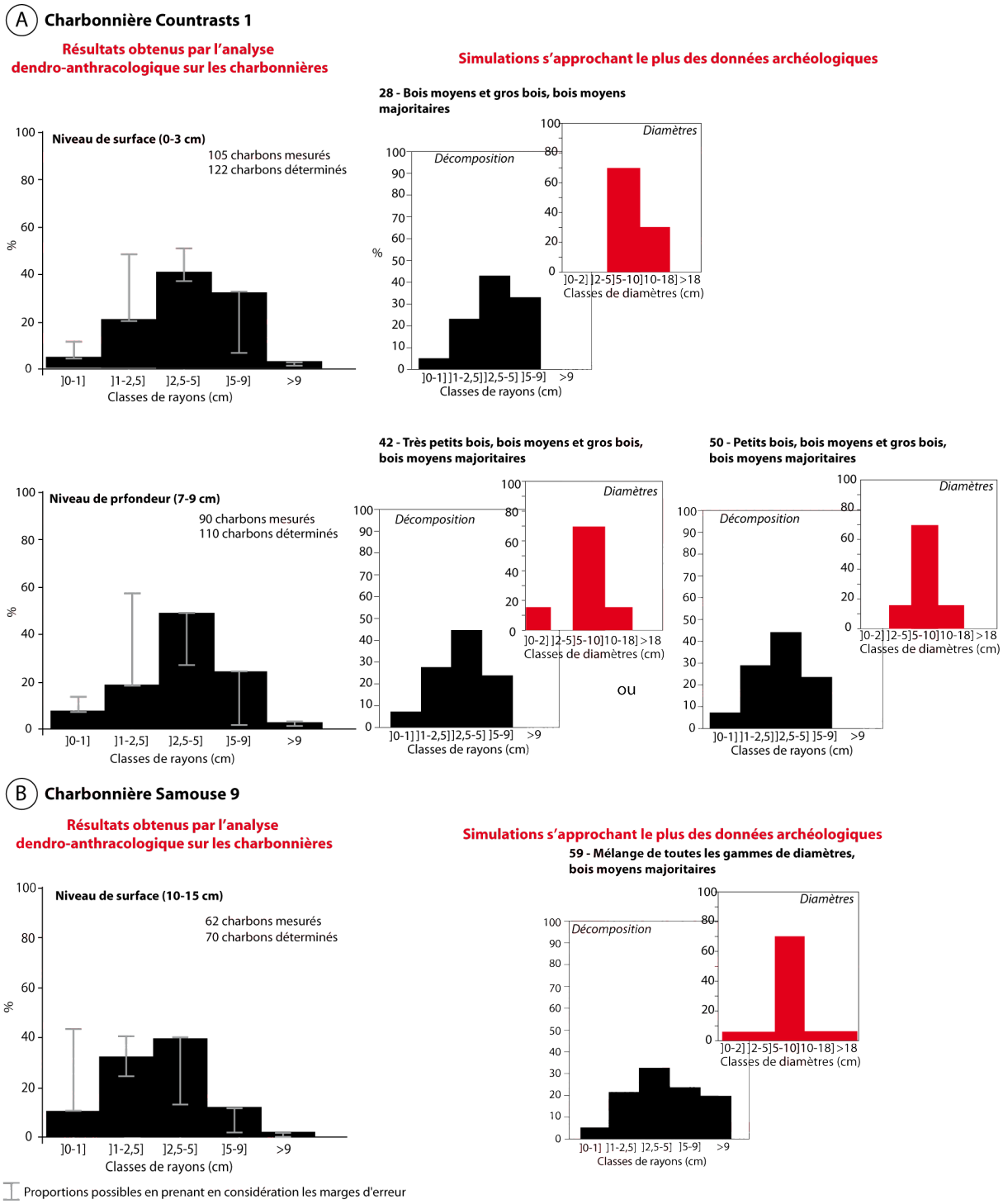


Figure 128 : Exemple de résultats présentant une dominance de bois compris entre 5 et 10 cm de diamètre.

A) Le cas de la charbonnière Countrasts 1. B) Le cas du niveau de surface de Samouse 9

b) Trois présentant uniquement une utilisation de « petits bois »

Sur l'ensemble des niveaux étudiés, trois présentent une majorité de « petits bois ». (Vareilles 11 niveaux supérieur et inférieur et le niveau inférieur de Vareilles 47) (annexe 23 et 24)

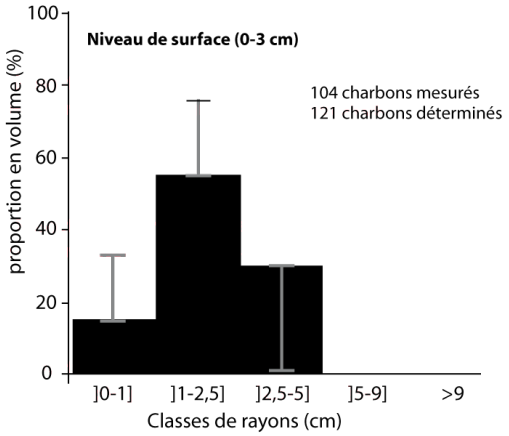
Les résultats obtenus sur les deux niveaux de la charbonnière Vareilles 11 sont très similaires (figure 129 A), on constate seulement une inversion dans les proportions des classes]0-1 cm] et]2,5-5 cm], ce qui explique le choix des simulations les plus proches. Malgré des associations à des simulations différentes (19 et 38) les diamètres de bois restitués sont très similaires. En effet, ce sont les « petits bois » qui sont majoritaires dans les deux assemblages et ils sont systématiquement associés à des « bois moyens » en plus faible proportion.

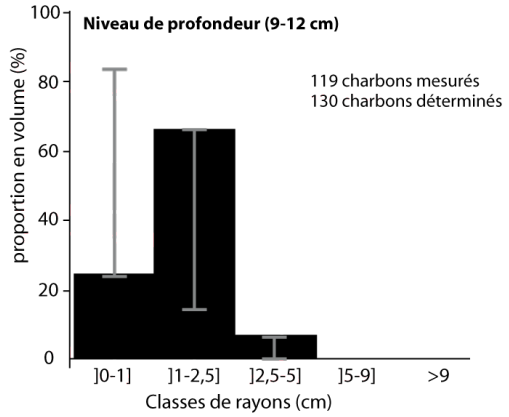
Le niveau supérieur de la charbonnière Vareilles 47 présente des résultats très similaires aux proportions par classes de rayons obtenus sur le niveau inférieur de la charbonnière Vareilles 11, et est de ce fait associé également à la simulation 38 correspondant à une utilisation majoritaire de « petits bois », auxquels sont ajoutés des « très petits bois » et des « bois moyens ». (figure 129 B).

Les résultats obtenus sur les deux niveaux de cette charbonnière sont très similaires, on constate seulement une inversion dans les proportions des classes]0-1 cm] et]2,5-5 cm], ce qui explique le choix des simulations les plus proches. Malgré des associations à des simulations différentes (19 et 38) les diamètres de bois restitués sont très similaires. En effet, ce sont les « petits bois » qui sont majoritaires dans les deux assemblages et ils sont systématiquement associés à des « bois moyens » en plus faible proportion.

A Charbonnière Vareille 11

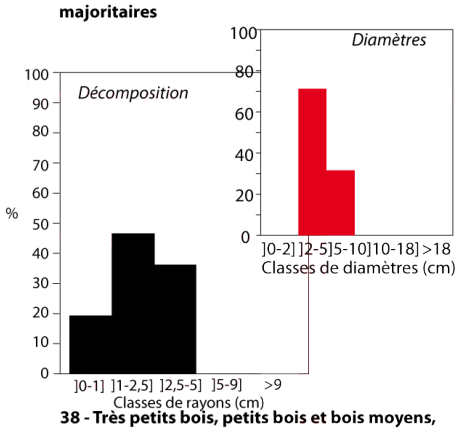
Résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique sur les charbonnières



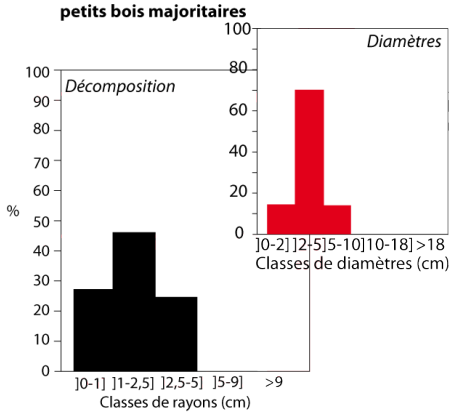


Simulations s'approchant le plus des données archéologiques

19 - Petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires

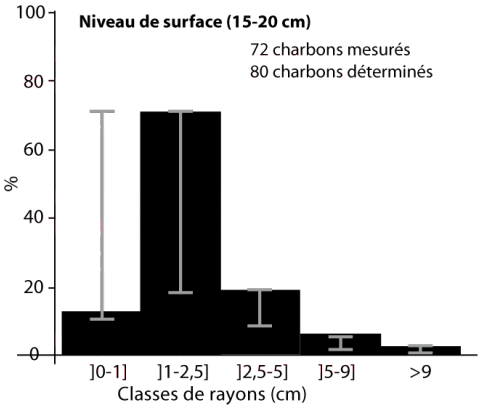


38 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires



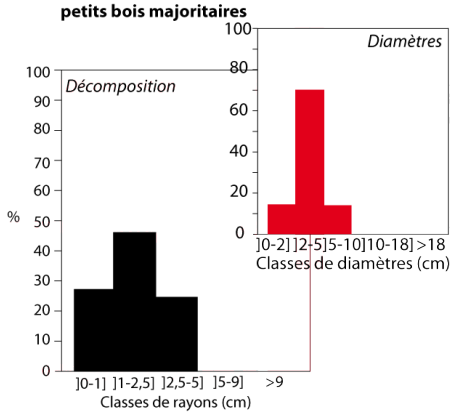
B Charbonnière Vareille 47

Résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique sur les charbonnières



Simulations s'approchant le plus des données archéologiques

38 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires



Proportions possibles en prenant en considération les marges d'erreur

Figure 129 : Exemple d'utilisation de « petits bois ». A) Le cas de la charbonnière Vareilles 11. B) Le cas du niveau de surface de la charbonnière Vareilles 47

c) Trois niveaux présentant une utilisation de « gros bois » et de « très gros bois »

A l'inverse, trois autres niveaux présentant une utilisation de « gros bois » en majorité (le niveau supérieur de Vareilles 47, et les niveaux inférieurs de Samouse 9 et Bourrassade 22) (annexes 24, 28 et 29).

Prenons l'exemple du niveau de surface de la charbonnière Bourrassade 22 et du niveau de profondeur de la charbonnière Samouse 9 (figure 130). Ces deux niveaux présentent des profils d'histogrammes assez caractéristiques, croisant jusqu'à la classe]5-9 cm], puis des proportions supérieures à 10 % pour la classe « >9 cm ».

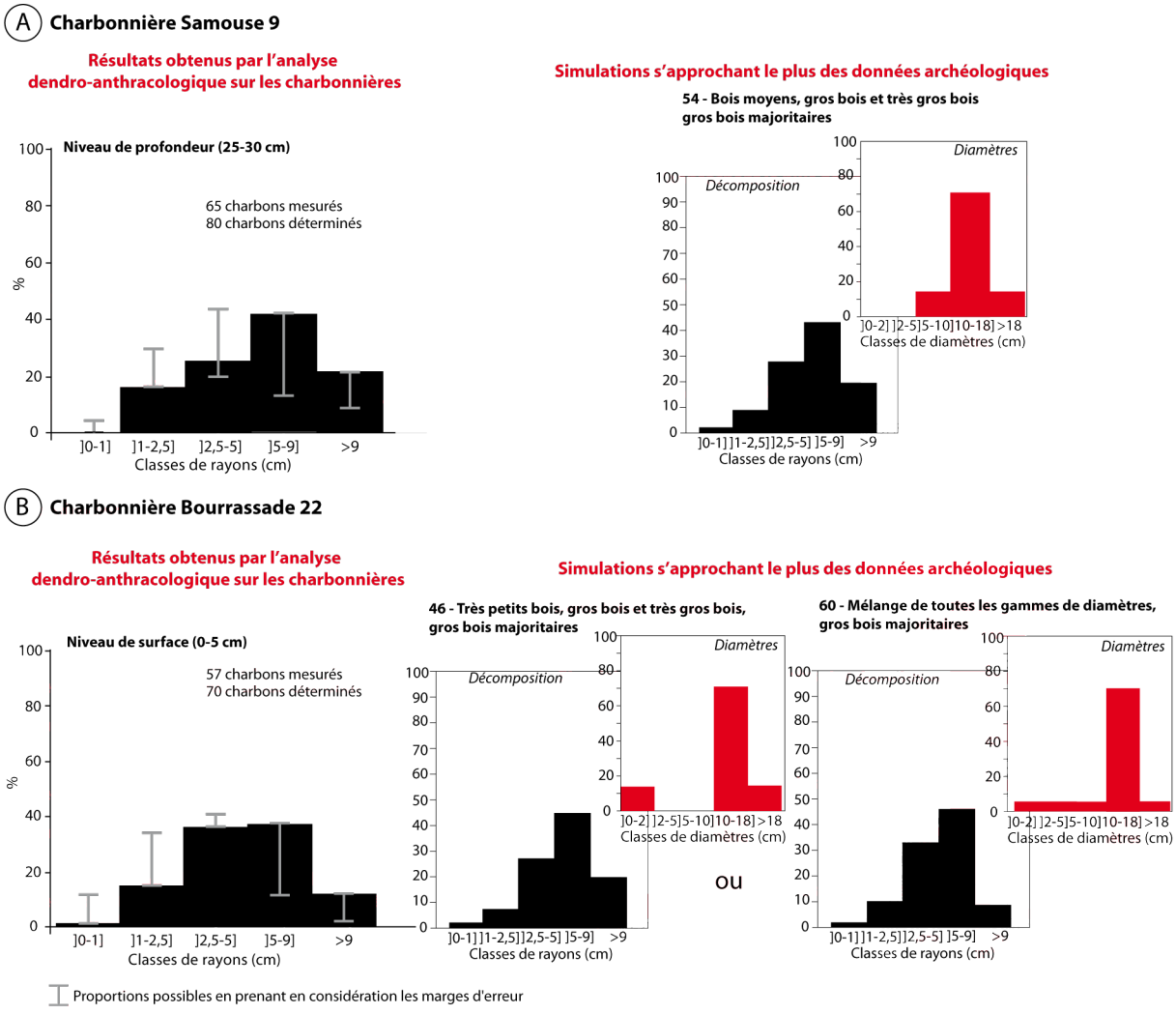


Figure 130 : Exemples d'utilisation de « gros bois ». A) Le cas du niveau de profondeur de Samouse 9. B) Le cas du niveau de surface de Bourrassade 22

A l'issue de la démarche comparative ces spectres sont interprétés comme en emploi en majorité des « gros bois », on note également une utilisation en plus faible quantité de « très gros bois ». Ces assemblages laissent entrevoir la présence d'arbres ayant des diamètres supérieurs à 20 cm de diamètre au moins à la base de la tige.

d) Les spectres dendro-anthracologiques proches des données issues du taillis de châtaignier

L'ensemble des niveaux étudiés sur les plateformes du mont Lozère présentent des profils en cloche. Cette forme très caractéristique a été observée sur le taillis de châtaignier lors de l'expérimentation réalisée à Pouligny. Il nous a semblé intéressant de comparer les données du mont Lozère à l'histogramme obtenu sur le taillis de châtaignier.
Parmi les seize niveaux précédemment présentés, quatre présentent des profils très similaires à celui obtenu sur le taillis de châtaignier et s'apparentent statistiquement à l'histogramme de référence (le niveau de surface de la charbonnière Corrizo 6 et les niveaux de profondeur des charbonnières Bourrassade 5 et 22 et Countrasts 2) (annexes 26, 27, 29 et 30).

Prenons les exemples du niveau supérieur de la charbonnière Corrizo 6 ainsi que le niveau inférieur de la charbonnière Bourrassade 5 (figure 131) (annexe 27 et 29).
Les profils obtenus sur ces deux niveaux présentent le profil en cloche avec les classes]1-2,5 cm] et]2,5-5 cm] majoritaires. Cela correspond bien au profil obtenu sur le taillis du châtaignier. En revanche pour le niveau supérieur de la charbonnière Corrizo 6, on retrouve également des proportions non négligeables dans la classe]5-9 cm], c'est pourquoi nous associons également la simulation 59 mettant en évidence la présence également de bois de plus gros diamètre.

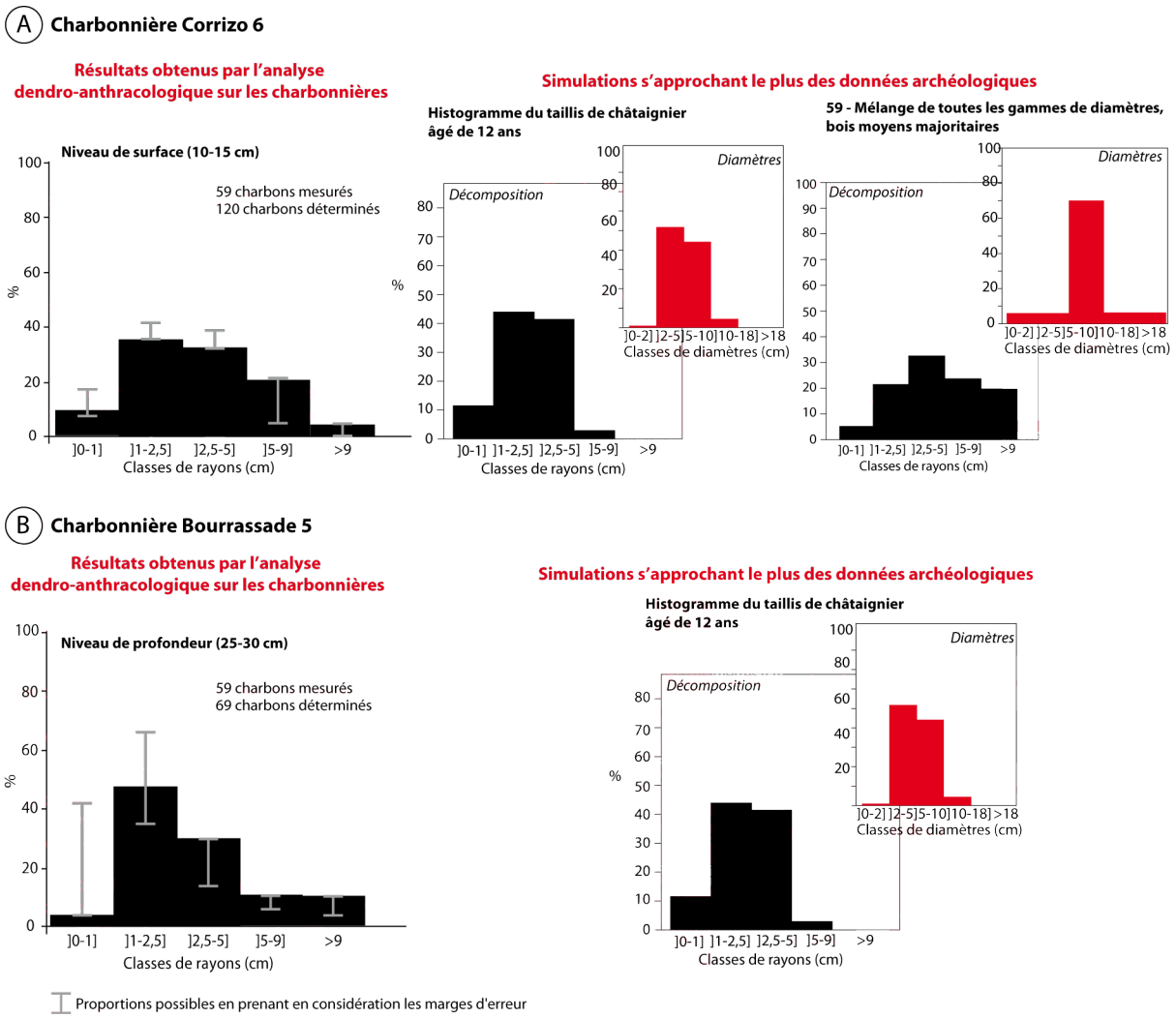


Figure 131 : Exemple de niveaux présentant des profils d'histogrammes similaires au taillis de châtaignier. A) Le cas du niveau de surface de la charbonnière Corrizo 6. B) Le cas du niveau de profondeur de la charbonnière Bourrassade 5

Il est encore délicat d'associer ces profils à l'exploitation de taillis car nous ne disposons pas de spectre de référence d'un taillis de hêtre. Bien évidemment, la morphologie d'un taillis de châtaignier est très éloignée de celle d'un taillis de hêtre. En effet, le châtaignier présente sur une souche des troncs bien droits et peu de branches, ce n'est pas le cas du taillis de hêtre qui développe beaucoup plus de branches sur les rejets de souche. Le profil des histogrammes obtenus sur un taillis de hêtre sera probablement différent, mais il est probable que l'on retrouve cette forme en cloche qui s'explique par de faibles proportions de bois de gros diamètres, correspondant à la base des tiges principales, et de fortes proportions au sein des classes de rayons]1-2,5 cm],]2,5-5 cm], qui correspondent à la tête des tiges ou encore à l'ensemble des ramifications de l'arbre.

Quatre niveaux permettent une très bonne association avec l'histogramme de référence du taillis de châtaignier, en revanche, tous les profils obtenus par l'analyse dendro-

anthracologique sur les plateformes archéologiques du mont Lozère, présentent cette forme en cloche avec comme classe de rayons majoritaire soit la classe]2,5-5 cm] ou encore dans la classe]5-9 cm] pour les plus gros diamètres restitués. Ces profils pourraient correspondre à des taillis plus âgés. Il est primordial à l'avenir d'établir des spectres de référence sur des peuplements de taillis de hêtre provenant de différentes placettes, plus ou moins fertiles, mais surtout ayant des âges différents. Cela permettrait de comparer les spectres dendro-anthracologiques des charbonnières archéologiques à des données théoriques proches de la réalité des stations forestières du mont Lozère.

L'emploi de bois à la fois de petits diamètres et de gros diamètre sur l'ensemble des charbonnières du mont Lozère laisse entrevoir la complexité de l'étude d'une « forêt métallurgique ». S'il ressort dans la majorité des cas une utilisation de « bois moyens » on retrouve également des témoignages de bois de plus petits diamètres qui peuvent laisser penser à des changements de gestion sylvicole. Est-ce lié à une surexploitation du taillis, ou bien à des changements de pratiques de charbonnier privilégiant des bois de plus petits diamètres ?

L'identification de niveaux présentant de gros diamètres pose également d'autres questions. Est-ce le témoignage de peuplements gérés de façon plus raisonnée ou cela résulte d'un abandon pendant un certain temps de ces espaces boisés ?

Il est donc intéressant d'étudier si ces différences de diamètres de bois correspondent à des pressions différentes sur le massif forestier selon les secteurs géographiques mais également selon les périodes chronologiques.

3.3.2. Entre fortes et faibles pressions sur le massif forestier, une évolution au cours des siècles

L'étude du diamètre des bois sur les prélèvements de surface et de profondeur avait pour but d'étudier l'évolution des massifs forestiers charbonniers sous l'impact des activités métallurgiques. L'identification de changements dans les diamètres employés peut révéler la façon dont les coupes étaient réalisées. Une diminution de diamètre traduirait une pression importante sur les massifs forestiers, au contraire une augmentation du diamètre des bois

serait le témoignage de coupes espacées laissant le temps aux arbres de se développer. Enfin l'absence de changement entre les niveaux peut refléter une gestion homogène dans le temps.

Les premiers résultats obtenus sur le mont Lozère présentent une diversité dans l'évolution des diamètres de bois charbonnés. Sur les huit plateformes étudiées, trois ne présentent pas de changement de diamètres entre les niveaux (Vareilles 11, Countrasts 1, Corrizo 6), deux présentent une diminution du diamètre des bois (Vareilles 47 et Samouse 9) et trois autres révèlent une légère augmentation du diamètre des bois dans les niveaux de surface (Countrasts 2, Bourrassade 5 et 22) (annexes 23 à 30).

a) Un horizon charbonneux homogène ou une gestion raisonnée de la forêt ?

Les charbonnières Vareilles 11, Countrasts 1 et Corrizo 6 ne présentent pas de changements dans les diamètres restitués à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique. On peut dire que la composition en diamètre restituée correspond à une seule image de la forêt à la même période ou bien que cela témoigne d'une absence d'évolution du massif charbonné au cours des siècles. Sur ces trois plateformes les deux hypothèses semblent être rencontrées.

En effet l'horizon épais de la charbonnière Corrizo 6 et la diachronie observée à partir des datations des deux niveaux étudiés plaident en faveur de la conservation des phases de carbonisation les plus anciennes en profondeur et plus récentes en surface (figure 132) (annexe 27). Les compositions en diamètres restitués à partir des deux niveaux étudiés sont certes identiques mais correspondent à deux périodes chronologiques, mettant ainsi en évidence une gestion particulièrement homogène du massif charbonné.

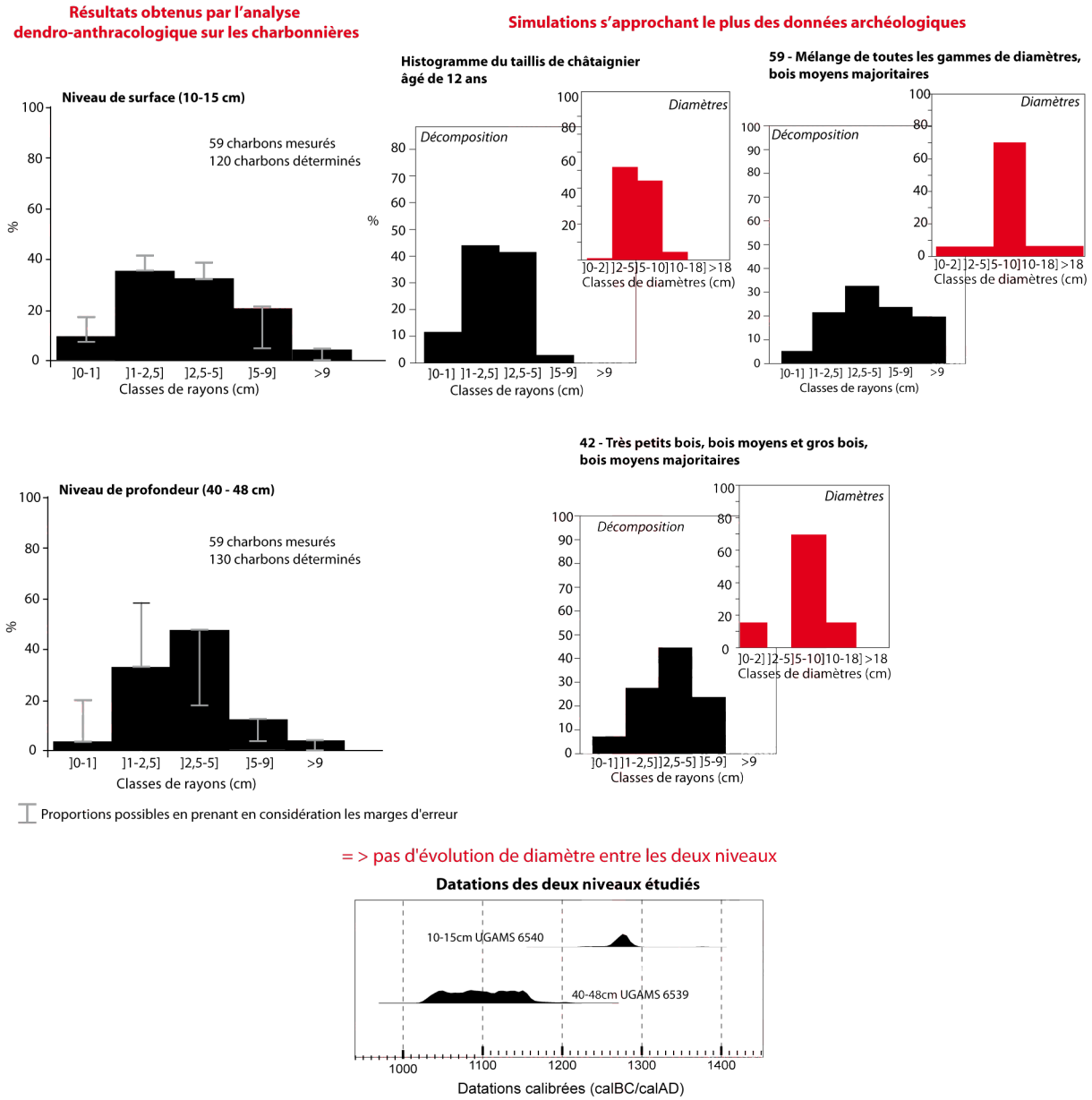


Figure 132 : Résultats obtenus pour la charbonnière Corrizo 6

En ce qui concerne les charbonnières Countrasts 1 et Vareilles 11, les niveaux étudiés sont très proches (quelques centimètres les séparent seulement) et les datations ne révèlent aucune différence (figure 128 et figure 129) (annexes 23 et 25). Ces données peuvent être identiques du fait d'un brassage important des charbons ayant rendu l'horizon charbonneux parfaitement homogène et moyennant l'ensemble des meules carbonisées à ces emplacements.

L'information apportée par chacune des charbonnières est inégale et doit donc faire l'objet d'une analyse très précise pour bien appréhender l'histoire des massifs charbonnés.

b) Vers une réduction du diamètre des bois

Sur deux plateformes de charbonnage Vareilles 47 et Samouse 9, on retrouve une diminution du diamètre des bois entre les deux niveaux étudiés (annexes 23 et 28). Celles-ci datent respectivement du XIe-XIIe siècles et du XIIIe siècle. La diminution de diamètre observée sur ces deux plateformes est assez importante, et notamment pour la charbonnière Vareilles 47 qui présente une majorité de « gros bois » dans le niveau de profondeur alors que l'on retrouve une majorité de « petits bois » dans le niveau de surface (figure 133). Ce changement radical dans le diamètre des bois peut être le reflet de rotations entre les coupes plus courtes ne permettant pas aux taillis de retrouver la physionomie des premières coupes.

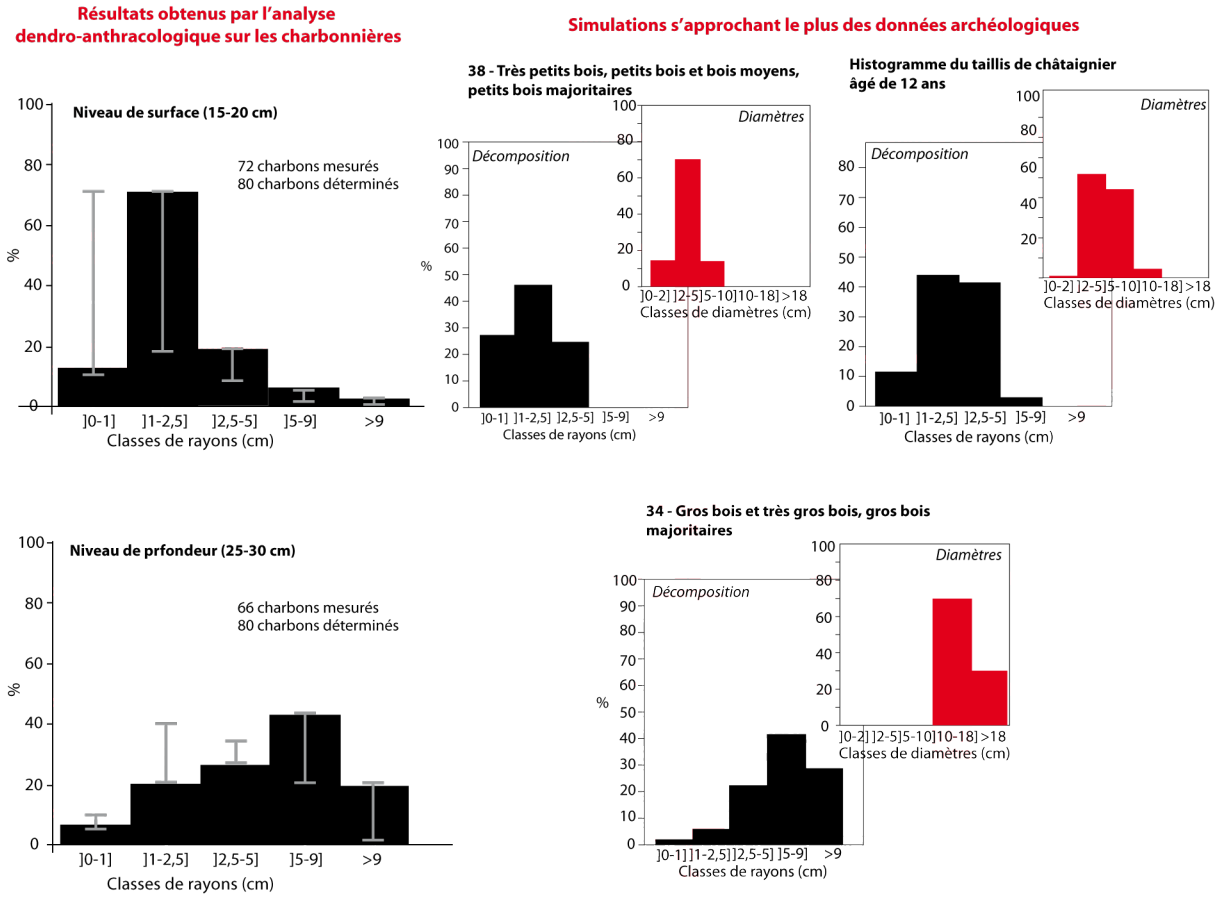


Figure 133 : Exemple de réduction du diamètre des bois obtenus sur la charbonnière Vareilles 47

Les datations relevant de ces deux cas de diminution du diamètre des bois correspondent à la période pour laquelle le plus grand nombre de sites a été daté (figures 114 et 119). Cela témoignerait alors d'une exploitation intensive des massifs forestiers entre le XIe et le XIIIe siècle pour répondre à des demandes importantes en charbon de bois afin de réduire le minerai de plomb argentifère.

c) Une augmentation du diamètre des bois.

Dans des secteurs proches de Vareilles et de Samouse on retrouve trois plateformes de charbonnage pour lesquelles des augmentations du diamètre des bois ont été constatées : Countrasts 2, Bourrassade 5 et 22 (annexes 26, 29 et 30). Cette augmentation est particulièrement bien marquée pour la charbonnière Bourrassade 22, avec des « bois moyens » majoritaire dans le niveau de profondeur et avec des « gros bois » dans le niveau de surface (annexe 30).

A la lumière des datations on observe que les charbonnières Countrast 2 et Bourrassade 22 correspondent à un relâchement des activités métallurgiques (XIIIe - XIVe siècles). En effet, au regard des datations obtenues sur les sites à scories, on observe une nette diminution des ateliers à cette période. L'augmentation du diamètre des bois pourrait témoigner d'une diminution de la pression des activités métallurgiques sur les taillis de hêtre. Les résultats de la charbonnière Bourrassade 22 en sont l'illustration. Bien que l'augmentation du diamètre des bois ne soit pas aussi marquée que pour la charbonnière Bourrassade 22, les diamètres plus petits sont datés des XI et XII siècles alors que les plus gros sont datés du XIIIe siècle, période pour laquelle les sites à scories retrouvés sont moins nombreux.

Ces premiers éléments de réflexion doivent encore être vérifiés en réalisant de nouvelles analyses sur d'autres plateformes éventuellement en datant d'autres sites à scories afin de vérifier ces périodes d'activités intenses, identifiées aujourd'hui à partir du corpus daté.

Les activités métallurgiques, souvent accusées de détruire les espaces forestiers, ne semblent pas ici responsables de la disparition de la forêt de hêtre du mont Lozère et cela semble se confirmer à travers d'autres indicateurs paléoenvironnementaux comme le pollen (Pulido Avila, 2006 ; Servera-Vives et al., 2010, 2011).

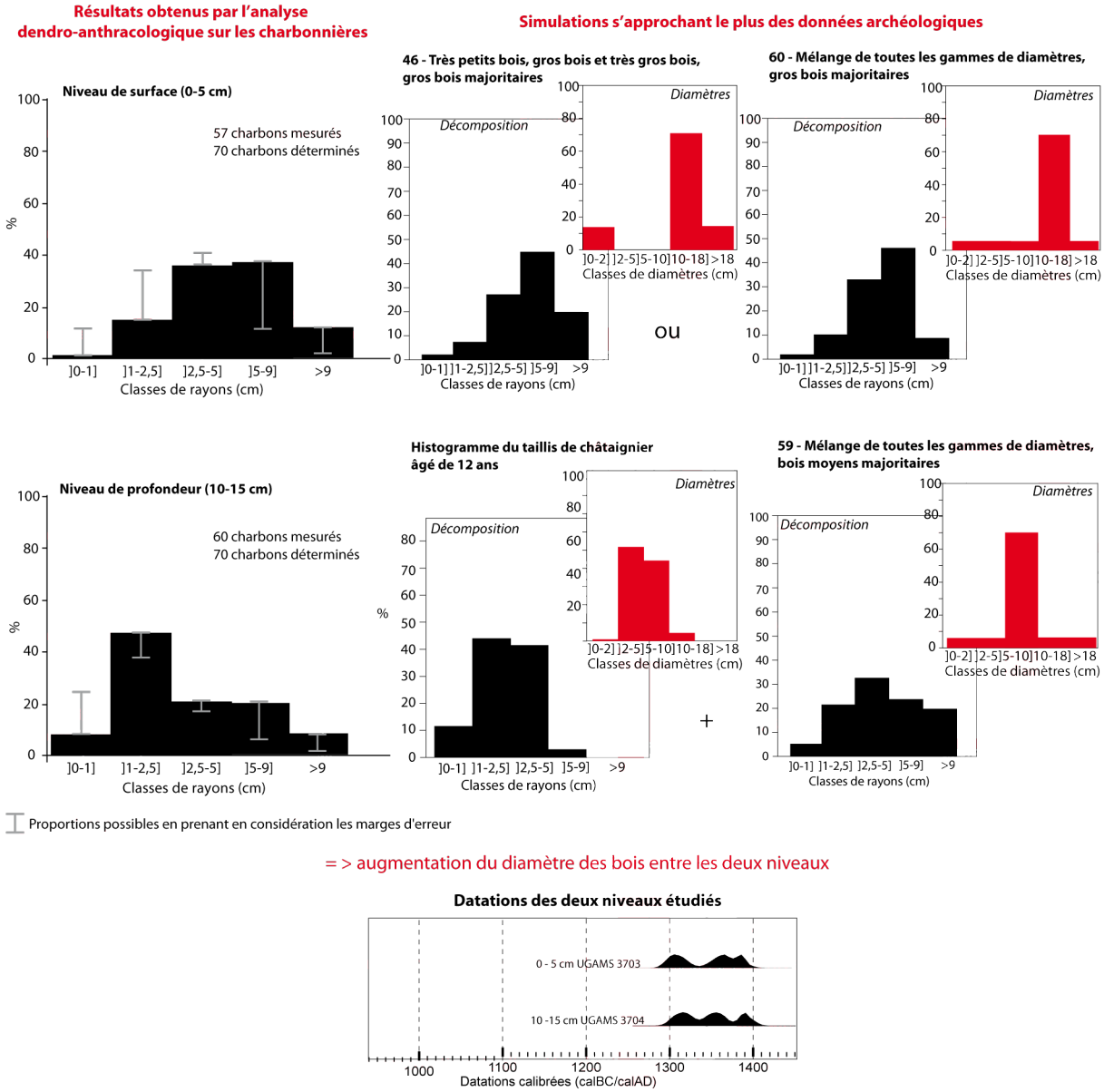


Figure 134 : Résultats obtenus pour la charbonnière Bourrassade 22

La tourbière de Countrasts, en plein cœur du district métallurgique, étudiée à très haute résolution, révèle des proportions de pollen de hêtre non négligeables et particulièrement stables sur la période correspondant à l'activité métallurgique. On ne constate pas de véritable diminution de pollens arboréens témoignant de coupes importantes dans les bois. De plus, à la fin de la période liée aux activités métallurgiques, les proportions de pollen de hêtre sont aussi importantes qu'au début de ces activités (Servera-Vives et al., 2010, 2011). On peut attester, à travers ces travaux, de la présence de hêtre sur le mont Lozère, après la période d'activité de réduction du plomb argentifère.

Compte tenu de ces observations, la disparition de la forêt de hêtre peut difficilement être attribuée à une surconsommation du bois pour réduire le minerai. Pendant cinq siècles, les métallurgistes ont exploité un taillis de hêtre sans forcément le dégrader de façon irréversible. Il est donc nécessaire de se tourner vers d'autres facteurs explicatifs de la mise en place de ces espaces ouverts. L'augmentation du pastoralisme nécessitant une ouverture du milieu, aujourd'hui étudié dans le cadre d'un nouveau projet collectif de recherches, pourrait expliquer le déclin progressif de la hêtraie.

Conclusion.

Les recherches conduites maintenant depuis près de 15 ans sur le mont Lozère ont apporté et apportent encore de nombreuses réponses concernant l'histoire des paysages et des activités humaines sur ce territoire. La métallurgie semble y avoir joué un rôle non négligeable et laisse encore de nombreuses traces de pollution.

Les résultats apportés par ces travaux montrent combien les paysages évoluent en lien avec les activités humaines. La découverte d'une forêt de hêtre sur les versants du mont Lozère, longtemps insoupçonnée, laissent entrevoir un type de paysage adapté aux conditions altitudinales et climatiques du mont Lozère. En effet, les activités agropastorales en diminution n'entretiennent plus suffisamment les espaces ouverts et on constate progressivement une reconquête des massifs boisés de pins à crochets et de pins sylvestres.

S'il est encore difficile de prévoir les paysages à venir, en revanche il est possible d'étudier plus en détail la végétation de l'époque médiévale. On peut regretter le faible nombre de plateformes étudiées à ce jour. Il est nécessaire de poursuivre ces investigations, en multipliant les analyses permettant ainsi d'asseoir ou au contraire de proposer de nouvelles hypothèses sur les modes de gestion de cette « forêt métallurgique ». A la lumière de ces premiers résultats on peut donc imaginer les versants du mont Lozère couverts de taillis de hêtre, exploités pour réduire le plomb argentifère indispensable pour battre monnaie. C'est un paysage protoindustriel qui peut alors être redessiné, avec une multitude de plateformes de charbonnage fumant dans les forêts et des fours de réduction fonctionnant à plein régime, sans toutefois négliger les espaces pâturés par les ovins attestés par les fouilles archéologiques de quelques enclos mais également visibles dans les diagrammes polliniques (Orengo-Romeu *et al.*, 2011 ; Servera-Vives *et al.*, 2010, 2011).

Les recherches doivent bien évidemment être poursuivies pour restituer au mieux l'image de cette « forêt métallurgique » aujourd'hui oubliée.

Conclusions et perspectives

Quelles que soient les époques, les secteurs géographiques ou encore le type de métallurgie, la forêt est au cœur des préoccupations des métallurgistes et constitue un des principaux éléments à prendre en considération dans le choix de l'implantation des ateliers ou des complexes industriels, pour les périodes les plus récentes.

Cette thèse, inscrite dans les recherches conduites sur l'histoire des forêts françaises et sur leur mode de gestion par le passé a eu pour objectif de proposer de nouvelles démarches pour aborder cette question de façon transversale. Elle a été l'occasion de réfléchir de manière globale et intégrée aux différentes façons d'aborder la question des « forêts métallurgiques » en étudiant d'une part des documents historiques et d'autre part des archives archéobotaniques, principales entrées pour restituer l'histoire complexe des relations entre activités métallurgiques et massifs boisés. Ce travail, intégré à deux Programmes Collectifs de Recherches basés sur l'interdisciplinarité, a été l'occasion d'affiner et de développer de nouvelles méthodes, de nouveaux outils permettant d'accéder à l'image des espaces charbonnés pour produire le combustible nécessaire à la production de métal.

L'étude des textes des Temps Modernes et de l'Epoque Contemporaine en Périgord-Limousin permet d'évaluer les surfaces forestières consommées par les fours. L'analyse anthracologique conduite sur les plateformes de charbonnage du mont Lozère autorise quant à elle une restitution de la physionomie des forêts.

Les résultats obtenus dans le cadre de cette thèse semblent prometteurs pour mieux comprendre le rôle joué par les activités métallurgiques sur les espaces forestiers bien que certains points méthodologiques doivent encore être approfondis pour s'approcher au mieux de l'histoire des « forêts métallurgiques ».

Pour conclure ce travail de thèse, il nous semble intéressant de reprendre succinctement les acquis de chacune des méthodes et de développer les éléments qui nécessitent de poursuivre les recherches pour affiner ces protocoles d'étude.

EVALUER LES SURFACES FORESTIÈRES CONSOMMÉES PAR LES ÉTABLISSEMENTS SIDÉRURGIQUES DU PÉRIGORD LIMOUSIN

La première question posée était de mettre en place un protocole analytique évaluant, à partir de productions de fonte et de fer déclarées par les établissements sidérurgiques ,les surfaces forestières consommées. Nous avons donc procédé par étapes successives, remontant des productions de fonte et de fer à la consommation de charbon de bois puis au volume de bois pour enfin arriver à évaluer les surfaces forestières coupées afin de produire le combustible nécessaire.

La comparaison de ces surfaces forestières aux surfaces de taillis connues à travers l'étude des cadastres napoléoniens nous a permis de mesurer l'emprise des forges sur le couvert forestier existant au début du XIXe siècle. L'exemple de la forge de Savignac-Lédrier (Dordogne) met en évidence l'utilisation quasi totale des forêts gérées en taillis des communes citées comme approvisionnant la forge. Ces importants prélèvements en bois de taillis pour une seule forge témoignent d'une pression forte des activités métallurgiques sur la forêt venant conforter l'idée d'une surexploitation des forêts présentée dans certains textes. Mais la forge de Savignac-Lédrier est loin d'être la seule sur ce territoire ; on connaît près de 250 établissements sidérurgiques en Périgord Limousin, certains produisant des quantités de fonte et de fer plus importantes. Les conséquences sur les massifs forestiers devaient être importantes ; on peut dès lors s'interroger sur l'approvisionnement en bois d'autres activités industrielles (tuileries, verrerie etc.) mais également sur l'alimentation en bois de chauffage des villes.

A ce jour, il est nécessaire de poursuivre ces recherches, de vérifier la fiabilité des productions des établissements sidérurgiques rapportées par les différents auteurs sur lesquels nous nous sommes appuyés en étudiant les documents d'origine. Une étude détaillée des archives reste à envisager en ce concentrant sur des fenêtres d'études particulières. On peut en effet se demander si les activités métallurgiques fonctionnaient de la même

manière sur l'ensemble du territoire du Périgord Limousin, si leur emprise sur les espaces forestiers était aussi importante que celle mise en évidence à travers l'étude de la forge de Savignac-Lédrier. Il semble donc intéressant d'élargir la fenêtre d'étude autour de Savignac-Lédrier et pourquoi pas d'en ouvrir deux autres ; une à l'ouest de la zone d'étude, à la limite de la Dordogne et de la Charente, zone où de nombreuses grosses forges fonctionnaient pour fournir en canons la Marine Royale ; une autre dans le sud de la Haute Vienne, secteur où les établissements sidérurgiques étaient moins nombreux et procédaient essentiellement à la phase d'affinage.

Pour confronter les surfaces forestières consommées à la réalité des massifs, il est nécessaire de poursuivre les investigations à travers les cadastres napoléoniens afin de connaitre l'occupation du sol sur des territoires plus vastes. L'étude des états de section permet déjà d'obtenir une image globale des surfaces disponibles pour chaque commune. En étudiant la répartition des massifs forestiers à l'échelle de la parcelle au sein de chaque commune, il est possible d'approfondir les recherches.

L'analyse des noms des propriétaires des forges et des espaces boisés permet d'envisager des recherches à travers les actes notariés pour étudier des actes de vente des bois ce qui permet de mieux comprendre les stratégies d'approvisionnement en combustible en étudiant le prix de vente en fonction des essences, de l'âge des bois et de la distance à parcourir pour l'acheminer à la forge.

Ce présent travail a permis ainsi d'initier une dynamique de recherche, la mise en place des méthodes applicables à l'ensemble du territoire du Périgord Limousin qui, nous en sommes sûr, continueront à être développées à travers les travaux conduits dans le Programme Collectif de Recherche « Géohistoire et géoarchéologie de la forêt combustible en Limousin Poitou-Charentes » (Dir Rouaud) et par les recherches des associations impliquées sur le territoire (La Route des Tonneaux et des Canons).

Il est bien évidemment indispensable de poursuivre ces recherches à partir de ces documents faciles d'accès. En revanche il faut toutefois prendre conscience que ces documents du XIXe siècle permettent essentiellement d'étudier la dernière phase d'activité des établissements sidérurgiques du Périgord Limousin. En effet, sur ce territoire la production

de fonte et de fer se généralise au XVIIe siècle, atteint son apogée au XVIIIe siècle et décline progressivement au XIXe siècle pour quasiment disparaître après 1860 avec la signature du traité de libre échange avec l'Angleterre, date à laquelle les forges du Périgord Limousin ne peuvent plus lutter contre la concurrence des fers étrangers moins coûteux.

Il serait alors intéressant de remonter dans le temps. Plusieurs pistes s'offrent à nous pour évaluer les productions métalliques ; nous connaissons quelques forges particulièrement bien renseignées (Bonreceuil, Ruelle, Planchemeunier, La Rivière), pour lesquelles nous connaissons des livres de roulements ou encore des bons de livraison de produits finis. S'il est possible d'évaluer les surfaces consommées par ces établissements à partir des productions de fonte, il est nécessaire d'évaluer les surfaces forestières disponibles à ces périodes. On peut alors utiliser les cartes d'état major ou encore des plans plus précis mais plus fragmentaires que sont les plans des jésuites connus notamment dans le Limousin.

L'histoire de la métallurgie du fer en Périgord Limousin ne peut pas se résumer aux Temps Modernes et à l'Epoque Contemporaine ; on retrouve en effet, sur ce même territoire, de nombreux indices de métallurgie plus ancienne, médiévale en forêt de la Braconne (en Charente) (Rassat, 2010, 2011, 2012) ou encore antique dans le nord de la Dordogne (à proximité de Soudat) (Peyrony, 2001). Pour ces périodes ce sont d'autres techniques de réduction qui sont employées, d'autres stratégies d'implantation et donc d'autres modes d'approvisionnement en combustible. L'étude des « forêts métallurgiques » nécessite alors de travailler sur d'autres archives que les textes, d'employer d'autres méthodes que sont les fouilles archéologiques et l'étude archéobotanique. Cette approche est développée dans le cadre de la thèse de G. Rassat débutée en 2011 (Dir P. Allée, N. Dieudonné Glad et M.C. Bal-Serin). Les ferriers et les plateformes de charbonnage sont au cœur de ces problématiques pour étudier la physionomie des « forêts métallurgiques » antiques et médiévales.

Dans le cadre de cette étude, la mise en évidence de l'intérêt des plateformes de charbonnage a largement été abordée mais l'application a été réalisée sur un contexte très différent à la fois par la période chronologique et par le type de métallurgie : le mont Lozère.

VERS UNE RESTITUTION DES SYLVOFACIES CHARBONNÉS : L'INTÊRET DE L'ÉTUDE DU DIAMÈTRE DES BOIS

Si certains textes permettent de retracer la physionomie des forêts, ils restent rares et souvent considérés comme subjectifs. Le mauvais état des forêts décrit, les modes de gestion des taillis à très courtes révolutions souvent présentés sont-ils représentatifs des « forêts métallurgiques » ? Pour y répondre de manière plus objective, l'étude des plateformes de charbonnage s'est révélée être un excellent indicateur. Au delà de l'approche spatiale et temporelle et de l'identification taxonomique généralement réalisées sur ces vestiges (Bonhôte, 1998 ; Izard, 1999 ; Davasse, 2000 ; Euba, 2008), l'étude du diamètre des bois, encore rarement appliquée à ces contextes, permet d'entrevoir les modes de gestion de ces forêts charbonnées (Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Dufraisse, 2002 ; Ludemann, 2010).

En effet dans le cadre de ce travail nous avons développé une approche méthodologique permettant de vérifier la représentativité des spectres dendro-anthracologiques obtenus sur des plateformes de charbonnage expérimentales. Différentes étapes ont été nécessaires.
Dans un premier temps, il s'agissait d'évaluer les différentes méthodes existantes pour mesurer le rayon de courbure. Il ressort de cette analyse de très bons résultats pour la méthode basée sur la trigonométrie dans un triangle isocèle alors que l'on peut affirmer que l'outil cercle est à proscrire pour étudier le diamètre des bois brûlés.

A partir de la méthode de mesure la plus fiable nous avons donc, dans un second temps, élaboré une application informatique « AnthracoLoJ » permettant de simplifier l'acquisition des données. Après avoir réalisé un nombre important de mesures sur des sections de bois et des fragments de charbons nous avons pu calculer l'erreur associée à la mesure des rayons de courbure, celle-ci étant évaluée à +/- 26 %. C'est en connaissant parfaitement le facteur correctif qu'il faut appliquer à la mesure des rayons de courbure, que nous avons ensuite testé la représentativité des spectres dendro-anthracologiques sur le contexte de charbonnage.

L'approche expérimentale réalisée à Pouligny, largement exposée dans ce travail, permet aujourd'hui d'assurer la bonne représentativité des résultats de l'analyse des charbons de bois. L'important travail réalisé en amont de la carbonisation, coupe des bois, mesure du diamètre de chaque bûche, a permis de développer une approche comparative entre les données connues avant la carbonisation et celles obtenues à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique. Il s'agissait alors dans ce travail d'évaluer si la carbonisation en meule pouvait conduire à une déformation importante des spectres dendro-anthracologiques et de vérifier la capacité des outils de mesure à différencier les assemblages de bois de petits diamètres d'un mélange de bois de gros diamètres.

A l'issue de cette analyse les proportions de volume par classe de rayons sont globalement retrouvées pour les trois essences et pour les trois charbonnières à condition de choisir les bons facteurs correctifs sur les rayons de courbure mesurés. En effet, il est intéressant de rappeler que les données obtenues sur le chêne et le hêtre doivent être corrigées en ajoutant systématiquement à chaque rayon de courbure la marge d'erreur associée à la mesure avec l'outil « anthracoLoJ » c'est à dire + 26 %. En revanche, le châtaignier ne nécessite pas de correction des rayons de courbure pour s'approcher aux mieux des données connues avant la carbonisation. S'il est rassurant de retrouver les bonnes proportions par classe de rayons, nous l'avons largement exposé dans le cadre de ce travail, cela ne permet pas d'accéder directement à l'image du diamètre des bois employés.

La seconde étape pour l'étude du diamètre des bois est la phase de « réassociation » développée dans le chapitre 5. Cette étape a fait également l'objet d'une approche méthodologique pour aboutir à l'élaboration d'une nouvelle méthode pour restituer le diamètre des bois à partir des spectres obtenus après analyse des charbons de bois. Inspirée des deux modèles existants (Nelle, 2002 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Dufraisse, 2002), c'est une démarche comparative qui a été développée. Elle consiste à comparer les spectres archéologiques à des histogrammes de référence construits à partir d'assemblages théoriques de différentes gammes de diamètres. Nous nous sommes appuyés sur une soixantaine de simulations pour interpréter les données archéologiques en diamètre de bois charbonné.

Pour évaluer la pertinence de cette démarche comparative, les spectres dendro-anthracologiques obtenus lors des expérimentations de Pouligny ont été comparés à ces

simulations. A travers cette analyse on différencie bien les trois charbonnières, notamment celles aux petits et aux gros diamètres mais finalement l'association aux simulations théoriques est parfois compliquée. Du fait du nombre restreint de simulations, on ne retrouve pas l'ensemble des cas de figures. Cela est particulièrement visible pour les histogrammes présentant l'ensemble des classes de rayons avec de plus fortes proportions dans les classes] 2,5-5cm] et] 5-10 cm] et de faibles proportions dans les classes] 10-18 cm] et « supérieurs à 18 cm ». Nous sommes conscients que pour affiner la restitution du diamètre des bois il est nécessaire de construire une base de données avec un nombre de simulations de référence important, à la fois basée sur des assemblages purement théoriques et mathématiques mais également en prenant en considération des contextes naturels, des types de peuplement ou encore des modes de gestion et de collecte de bois. Cette démarche a été initiée à partir des données obtenues sur le taillis de châtaignier et est actuellement poursuivie dans le cadre d'une collaboration avec Ch. Belingard (chercheure associée au laboratoire Géolab UMR 6042 CNRS)

Même si la restitution du diamètre des bois nécessite encore quelques perfectionnements, la mise en application de l'étude du diamètre des bois est envisageable compte tenu de la fiabilité des outils permettant la mesure du rayon de courbure. Les spectres dendro-anthracologiques pourront à l'avenir faire l'objet de nouvelles interprétations à la lumière des nouvelles simulations mises en place.

La première application sur les plateformes du mont Lozère apporte un nouveau regard sur l'histoire de la « forêt métallurgique » médiévale. L'idée récurrente d'une augmentation des activités métallurgiques dans le temps, surexploitant les massifs forestiers, ne peut être appliquée sur le territoire du mont Lozère. En effet, sur toute la période, on retrouve une utilisation de bois de moyens diamètres, avec sur quelques plateformes une tendance à la diminution des diamètres alors que sur d'autres on retrouve de plus gros bois dans les niveaux de surface. L'arrêt des activités métallurgiques et de charbonnage ne correspond pas à la diminution du diamètre des bois ce qui aurait révélé un épuisement de la ressource en bois. Par ailleurs, il semble que la forêt de hêtre soit toujours présente à la fin des activités de réduction du plomb argentifère, les études polliniques l'attestent également (Pulido Avila, 2006 ; Servera-Vives *et al.*, 2010, 2011).

Les approches archéobotaniques et historiques permettent chacune d'apporter une image des « forêts métallurgiques ». Il est primordial, dans la mesure du possible, de mener ces deux approches de manière intégrée. Si cela semble encore compliqué sur le territoire du mont Lozère en raison du faible nombre de sources écrites connues à ce jour, en revanche, le secteur du Périgord Limousin permet de conduire ce genre de démarches plus aisément. Des premières analyses ont été réalisées sur une vingtaine de plateformes de charbonnage et permettent aujourd'hui de confronter ces données archéobotaniques aux documents historiques (Euba-Rementeria et Allée, 2009).

Il reste encore beaucoup à apprendre des « forêts métallurgiques ». Si certaines ont été surexploitées, au contraire, dans certains secteurs elles semblent avoir fait l'objet de gestion raisonnée, la métallurgie valorisant ainsi la ressource en bois. Chaque période et chaque site doit faire l'objet d'études détaillées pour restituer au mieux l'histoire de ces espaces forestiers.

Bibliographie

Sources manuscrites et cartographiques

Archives départementales de la Haute-Vienne

Cadastres napoléoniens des communes de :

- Chalus - 1813 - 3P042

- Champagnac le Rivière - 1809 - 3P044

- Cussac - 1839 - 3P064

- Dournazac - 1841 - 3P070

- La chapelle Montbrandeix - 1837 - 3P047

- Saint Mathieu - 1837 - 3P178

- Glandon - 1837 - 3P085

Archives départementales de la Dordogne

Cadastres napoléoniens des communes de :

- Dussac - 1811 - 3P3 1737-1749

- Génis - 1811 - 3P3 2141-2155

- Lanouaille - 1812 - 3P3 2495-2507

- Payzac - 1810 - 3P3 3579-3605

- Saint Mesmin - 1811 - 3P3 5187-5206

- Sainte Trie - 1811 - 3P3 4588-4595

- Sarrazac - 1811 - 3P3 5794-5812

- Savignac Lédrier - 1810 - 3P3 5833-5848

- Thiviers - 1810 - 3P3 6102-6118

Archives départementales de la Corrèze

Cadastres napoléoniens des communes de :

- Beyssenac - 1814 - FRAD019-09P03-05

- Lubersac - 1814 - FRAD019-09P03-04

Source ancienne éditée

Pline, traduction de 1962. Histoire naturelle L. XVI. Paris : Les Belles Lettres.

Bibliographie ancienne

Agricola, G., 1556. *De Re Metallica*, translated from the first latin edition of 1556 with Biographical Introduction, Annotations and Appendices upon the Development of Mining…, by HOOVER (H. C.) et HOOVER (L. H.), New-York, Dover Publications, 1950.

Biringuccio, V., 1572. La pyrotechnie, ou art du feu contenant dix livres. Chez C. Frémy, Paris.

Buffon, G.-L.L., 1739. Mémoire sur la conservation et le rétablissement des forests. Académie Royale des Sciences.

Buffon, G.-L.L., 1742. Mémoire sur la culture des forests. Académie des sciences.

Gruner, L., 1875. Traité de métallurgie. Paris : Dunod.

Guyot, A., 1770. « Manuel forestier et portatif », in *Traité Des Forêts De M. Duhamel Du Monceau*. Paris : Saillant et Nyon.

Minisitre des finances, 1811. Recueil méthodique des lois, décrets, règlements, instructions et décisions sur le cadastre de la France. Paris : Imprimerie Impériale.

Texier-Olivier, L., 1808. Statistique générale de la France : Département de la Haute-Vienne, Monographies des villes et villages de France. Paris : Res Universis. Réédité en 1992.

Bibliographie récente (postérieure à 1900)

Allée, Ph., 2003. Dynamiques hydrosédimentaires actuelles et holocènes dans les systèmes fluviaux de moyenne montagne (Limousin, hautes Cévennes, Maures). Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Limoges.

Allée, P., 2004. «Inventaire, analyse taphonomique et sitologique», in Ploquin A. (dir).

PCR : Le Plomb Argentifère Ancien Du Mont Lozère. Mende : SRA Languedoc-Roussillon.

Allée, P., Bal-Serin, M.-C., 2010. Pratiques et mobilités territoriales sur le mont Lozère depuis le Néolithique. Gestion des ressources et services rendus aux sociétés du passé dans une moyenne montagne méditerranéenne. Rapport PCR. Mende : SRA Languedoc Roussillon

Allée, P., Boumédiène, F., Delhoume, J.P., 2006. «L'évolution des surfaces boisées du XVIIIe siècle à nos jours», in Allée Ph (dir). *PCR : « Géoarchéologie et Géohistoire Des Territoires Forestiers Limousins »*. Limoges : SRA Limousin, pp. 30–33.

Allée, P., Paradis, S., 2007. « Archéologie de la forêt charbonnée médiévale du Mont Lozère», in Ploquin A. (dir). *PCR : Le Plomb Argentifère Ancien Du Mont Lozère*. Mende : SRA Languedoc-Roussillon.

Allée, P., Paradis, S., 2009. «Forêts vs pelouse en hautes Cévennes (massifs de l'Aigoual et du Lozère), une perception idéalisée et ambigüe à l'épreuve des faits», in Corvol A. (éd.). *Forêts et paysages du Xe au XXIe siècle*. Besançon : GHFF.

Allée, P., Paradis, S., Boumédiène, F., Rouaud, R., 2011. «L'exploitation médiévale du plomb argentifère sur le mont Lozère». *ArchéoSciences*, n°34, pp. 177–186.

Amigues, S., 1993. Recherches sur les plantes de Théophrastes, traduction. Les Belles Lettres, Paris.

Ancel, B., Fluck, P., 1989. « Le paysage minier des sites métalliques des Vosges et de la Forêt-Noire ». *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest*. pp. 183–201.

Ancel, B., Py, V., Marconnet, C., Kammenthaler, E., Leleu, V., 2011. «Une mine de plomb argentifère dans un environnement montagnard», in *ArchéoSciences*, n°34, pp 203–220.

Andrieux, J.-Y., 1987. Forges et hauts fourneaux en Bretagne du XVIIe au XIXe siècle : Côtes-du-Nord. Nantes : Cid éditions.

Andrieux, J.-Y., 1991. Les travailleurs du fer, Paris : Gallimard.

Andrieux, J.-Y., Arnoux, M., Belhoste, J.-F., 1988. Forges et forêts : histoire industrielle de la France. Paris : CNRS éditions.

Arnould, E., 1978. « Métallurgie au bois et utilisation de la forêt », *Revue des forêts françaises.*

Arnoux, M., 1990. «Forges et forêts au Moyen Age : l'exemple normand», in Métailié J.P. (éd). *Forges et forêts : recherches sur la consommation proto-industrielle de bois*. Toulouse : Les Cahiers de l'ISARD, pp. 213–218.

Arnoux, M., 1993. Mineurs, ferrons et maîtres de forge : études sur la production du fer dans la Normandie du Moyen âge, XIe - XVe siècles. Paris : Ed. du CTHS.

Arribet-Deroin, D., 2001. Fondre le fer en gueuses au XVIe siècle : le haut fourneau de Glinet en pays de Bray (Normandie). Université Panthéon Sorbonne (Paris). Thèse de doctorat.

Arribet-Deroin, D., 2008. «L'usine à fer de Glinet», in Burnouf J. (éd). A*rchéologie Médiévale En France. Le Second Moyen Age (XIIe - XVIe Siècle)*. Paris : La découverte, pp. 122–123.

Audrerie, J., Chanaud, R., Grany, J.-C., 2006. La vie dans les campagnes du XVIIIe siècle n'était pas aussi idyllique que le suggèrent les plans joliment aquarellés des Archives départementales. Archives départementales Haute Vienne.

Badal-Garcia, E., 1992. « L'anthracologie préhistorique : à propos de certains problèmes méthodologiques », in Métailié J.P. (éd). *Les Charbons de bois, les anciens écosystèmes et le rôle de l'homme : colloque organisé à Montpellier du 10 au 13 septembre 1991*. Montpellier: Société Botanique de France, pp. 167–189.

Bailly-Maître, M.-C., 1999. Mines et forges des Alpes : de l'âge des métaux à l'industrie. Grenoble : Musée Dauphinois.

Bailly-Maître, M.-C., 2011a. «Le plomb et l'argent dans le Gévaudan médiéval.» *ArchéoSciences*, n°34, pp 137–148.

Bailly-Maître, M.-C., 2011b. « Extraction et traitement d'un minerai d'argent au Moyen Age (xiie-xive siècle) ». *ArchéoSciences*, n°34, pp 221–233.

Bailly-Maître, M.-C., Dupraz, J., 1979. Un village minier de haute montagne au Moyen âge: Brandes en Oisans (Huez-Isère). Grenoble : Centre Archéologique historique de Grenoble et de l'Isère.

Bailly-Maître, M.-C., Poisson, J.-M., 2007. Mines et pouvoir au Moyen Age. Actes de la table-ronde de Lyon, 15 mai 2002. Lyon : Presses universitaires de Lyon, Collection d'histoire et d'archéologie médiévales

Bal-Serin, M.-C., Julia, R., Liard, M., Allée, P., Paradis-Grenouillet, S., Servera-Vives, G., Miras, Y., Riera Mora, S., 2011. « Soil, charcoal, vegetation dynamics and agro-pastoral activities since Neolithic in the medium moutain of mont Lozère (France) », In E. Badal, Y. Carrion, E. Grau, M. Garcia , M. Ntinou (éds), *Ve International Meeting of charcoal analysis. The charcoal as cultural and biological heritage*. Valencia : *Saguntum* pp. 187-188.

Baron, S., 2005. Traçabilité et évolution d'une pollution métallurgique médiévale de plomb argentifère sur le mont Lozère. Université de Montpellier. Thèse de doctorat.

Baron, S., Carignan, J., Laurent, S., Ploquin, A., 2006. «Medieval lead making on mont-Lozère Massif (Cévennes-France) : tracing ore sources using Pb isotopes.» *Applied Geochemistry*, 21, pp. 241–252.

Baron, S., Le Carlier, C.M., Ploquin, A., 2011. « Géochimie isotopique du plomb en archéologie minière et métallurgique ». *ArchéoSciences*, n°34, pp 149-147.

Bary-Lenger, A., Nebout, J.-P., 1993. Les chênes pédonculé et sessile en France et en Belgique : écologie, économie, histoire, sylviculture. Alleur-Liège : Ed. du Perron.

Bastard, B.R., Métailié, J.-P., Poggi, G., Michaud, N., Aguila, J., 2000. Les charbonniers de l'Antola. Université Toulouse-Le Mirail : Centre Audiovisuel et Multimédia.

Battesti, V., 1992. Une charbonnière expérimentale, méthodologie de l'anthracologie sur charbonnière pour une approche de la gestion du milieu forestier en Languedoc. Université de Montpellier : Mémoire de DEA.

Beaulieu, J.L., Pons, A., 1979. « Recherches pollenanalytiques sur l'histoire de l'action humaine dans la région du Parc National de Cévennes ». *Annales du Parc National de Cévennes*, pp 101-128.

Bechmann, R., 1984. Des arbres et des hommes : la forêt au Moyen âge. Paris : Flammarion.

Beck, P., Braunstein, P., Philippe, M., 1994. « Le bois, le fer, et l'eau en forêt d'Othe à la fin du Moyen Âge : bilan et perspectives d'une recherche en cours (1992-1994) ». *Les Cahiers du Centre de Recherches Historiques*. 13.

Belhoste, J.-F., 1986. « Les forges en France ». *Dossiers histoire et archéologie*, n°107, pp 35-39.

Belhoste, J.-F., 1989. « Forges et forêts en révolution », in Woronoff (éd.). *Révolution et espaces forestiers. Colloque des 3 et 4 juin 1987*. Paris : l'Harmattan, pp. 127-136.

Belhoste, J.-F., 1990. « Une sylviculture pour les forges, XVIe - XIXe siècles », in Woronoff (éd.). *Forges et forêts : recherches sur la consommation proto-industrielle de bois*. Paris : Éd. de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales, pp. 219-261.

Belhoste, J.-F., 1992. « L'impact du haut fourneau sur la forêt normande (XVIe - XVIIe siècles) », in Métailié (éd.) *Proto-industries et histoire des forêts*. Toulouse : Les cahiers de l'ISARD, pp. 63-71.

Belhoste, J.-F., Lecherbonnier, Y., 1991. « Les conditions d'expansion (milieu XVIe -milieu XVIIe siècles) ». *La métallurgie normande : XIIe - XVIIe siècles*. pp 73-156.

Belhoste, J.-F., Robineau, E., Woronoff, D., Baptiste, G., Batardy, C., Brugier, M., France, 2003. « La métallurgie du Maine : de l'âge du fer au milieu du XXe siècle », *Cahiers du patrimoine*. n°64.

Benoit, A., 1990. « La consommation de combustible végétal et l'évolution des systèmes techniques », in Woronoff (éd.). *Forges et forêts : recherches sur la consommation proto-industrielle de bois*. Paris : Éd. de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales, pp. 87–150.

Benoit, P., 1986. « Forge de l'abbaye de Fonteneau ». *Dossiers histoire et archéologie*. n°107, pp 51–52.

Benoît, P., 1989a. « L'évolution d'un paysage minier et métallurgique. Pampailly au XVe siècle ». *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest*, n°96, pp.123–131.

Benoît, P., 1989b. « Conclusion : le concept de paysage et l'histoire des mines et de la métallurgie ». *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest*, n°96, pp. 233–236.

Benoit, P., Cailleaux, D., 1988. Hommes et travail du métal dans les villes médiévales : actes de la Table ronde la Métallurgie urbaine dans la France médiévale. Paris, Association pour l'édition et la diffusion des études historiques.

Blanchard, A., 2006. « Ressource en bois et gestion sylvicole au XVIIIe siècle, l'exemple de Dournazac », in Allée Ph. (dir). *PCR : Géoarchéologie et géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. 151–157.

Blanchard, A., Boumédiène, F., Roubelat, S., 2006. « Gestion des tènements du collège des Jésuites », in Allée Ph. (dir). *PCR : Géoarchéologie et géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. 159–160.

Boissière, J., 1990. « La consommation parisienne de bois et les sidérurgies périphériques : essai de mis en parallèle (milieu XVe - XIXe siècles.) », in Woronoff D. (éd). *Forges et forêts : recherches sur la consommation proto-industrielle de bois*. Paris : Éd. de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales, pp. 29–56.

Bonhôte, J., 1992. « La genèse de la «mémoire des charbonnières ; de la problématique écohistorique à la démarche géographique », in Métailié (éd.). *Proto-industries et histoire des forêts*. Toulouse : Les cahiers de l'ISARD, pp. 193–206.

Bonhôte, J., 1993. Forges à la catalane et évolution forestière dans les Pyrénées de la Haute-Ariège : pour une histoire de l'environnement. Université de Toulouse. Thèse de doctorat.

Bonhôte, J., 1998. Forges et forêts dans les Pyrénées ariégeoises : pour une histoire de l'environnement, Aspet : Pyrégraph.

Bonhôte, J., Fruhauf, C., 1990. « La métallurgie au bois et les espaces forestiers dans les Pyrénées de l'Aude et de l'Ariège », in Woronoff A. (éd.). *Forges et forêts : recherches sur la consommation proto-industrielle de bois*. Paris : Éd. de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales, pp. 151–212.

Bonnamour, G., Camizuli, E., Marconnet, C., 2010. « Fouille archéologique préventive « Le Cerisier », commune du Bonhomme (Haut-Rhin, avril 2006)». *ArchéoSciences*. n°34, pp 187–196.

Bouchillou, J., 1986. Les forges de l'Isle. Ecole Normale, Périgueux.

Bourgeois, C., 2004. Le châtaignier, un arbre, un bois. Paris : Institut pour le développement forestier, 2e édition.

Bourgin, H., Bourgin, G., 1920. « L'industrie sidérurgique en France au début de la Révolution». Paris : Ministère de l'Instruction publique.

Braadbaart, F., Poole, I., 2008. « Morphological chemical and physical changes during charcoalification of woods and its relevance to archeological contexts ». *Journal of Archaeological Science*, 35(9), pp 2434–2445.

Braunstein, P., 1986. « Mines et métallurgie en France. » *Dossiers histoire et archéologie*. n° 107, pp 18–23.

Braunstein, P., 1987. « Les forges champenoises de la comtesse de Flandre (1372-1404) ». Annales, économies, sociétés, civilisations, 42, n°4, pp. 747–777.

Brosselin, A., Corvol, A., Vion-Delphin, F., 1990. « Les doléances contre l'industrie », in Woronoff D. (éd.). *Forges et forêts : recherches sur la consommation proto-industrielle de bois*. Paris : Éd. de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales, pp. 11–28.

Burnouf, J., Beck, C., Bailly-Maître, M.-C., Duceppe-Lamarre, F., Guizard-Duchamp, F., Durand, A., Puig, C., 2008. « Société, milieux, ressources : un nouveau paradigme », in Bührer-Thierry G. (éd.). *Etre Historien Du Moyen Age Au XXIe Siècle*. Paris : publications de la Sorbonne.

Burri, S., 2008. « Enquête ethnoarchéologique sur le mode de vie et le savoir-faire des derniers charbonniers de Calabre (Italie) : entre tradition et modernité. », Cultures, Economies, Sociétés et Environnement du début de la Préhistoire au Moyen Age. Aix en Provence.

Cantelaube, J., 2002. Forge à la catalane et forgeurs ariégeois : la longue fidélité des Pyrénées à la réduction directe du minerai de fer (XVIIe - XIXe siècle). Université de Toulouse. Thèse de doctorat.

Cantelaube, J., 2005. La forge à la catalane dans les Pyrénées ariégeoises : une industrie à la montagne, XVIIe - XIXe siècles. Toulouse : CNRS Université de Toulouse-Le Mirail.

Cattin, F., Villa, I.M., Besse, M., 2009. « Copper supply during the Final Neolithic at the Saint-Blaise/Bains des Dames site (Neuchâtel, Switzerland) ». *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1, pp. 161–176.

Cauuet, B., 1984. Les mines d'or romaines du Nord-Ouest du Bierzo (province du Léon, Espagne). Université de Toulouse. Thèse de doctorat.

Cauuet, B., Baron, S., Morell i Cortes, N., 2010. « Rapport d'activités sur l'expertise en archéologie minière », in Allée (dir). *PCR : Pratiques et mobilités territoriales sur le mont Lozère depuis le Néolithique*. Mende : SRA Languedoc-Roussillon, pp. 37–42.

Cauuet, B., Laurent, S., Capdeville, C., Dessolin, T., Mossière, B., Ploquin, A., Baron, S., Tamas, C., 2011. « Etude d'une minière pour l'extraction de la galène argentifère près du mont Lozère - Le filon du Devois (Ispagnac) », in Allée (dir). *PCR : Pratiques et mobilités territoriales sur le mont Lozère depuis le Néolithique*. Mende : SRA Languedoc-Roussillon, pp. 13–31.

Cauuet, B., Tamas, C., 2008. « L'oppidum de Bibracte. Les exploitations minières », in Guillaumet (éd). *L'oppidum De Bibracte (Mont Beuvray, France). Bilan De 10 Années De Recherches (1996-2005)*. Budapest : Academiae Scientiarum Hungaricae, pp. 11–12.

Chabal, L., 1992. « La représentativité paléo-écologique des charbons de bois archéologiques issus du bois de feu », in Métailié J.P. (éd). *Les Charbons de bois, les anciens écosystèmes et le rôle de l'homme : colloque organisé à Montpellier du 10 au 13 septembre 1991,* Montpellier: Les Cahiers de l'ISARD, pp. 213–236.

Chabal, L., 1994. « Apports récents de l'anthracologie à la connaissance des paysages passés: performances et limites ». *Histoire et mesure*. pp. 317–338.

Chabal, L., 1997. Forêts et sociétés en Languedoc : Néolithique final, Antiquité tardive. L'anthracologie, méthode et paléoécologie. Paris : Documents d'archéologie française

Charnoz, J.C., 2003. Les forges de Baudin et le charbon de bois.

Chrzavzez, 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. Paris I Pathéon-Sorbonne. Mémoire de master II.

Claughton, P., 2010. « The crown silver mines and the historic landscape in Devon (England)». *ArchéoSciences*. n°34, pp. 299–308.

Clerc, P., 2011. « Le plomb chez Vannoccio Biringuccio, De La Pirotechnia (1540) ». ArchéoSciences, n°34, pp. 115–119.

Corvol, A., 1983. L'Homme et l'arbre sous l'Ancien Régime. Paris. Thèse de doctorat.

Corvol, A., 1987. L'homme aux bois : histoire des relations de l'homme et de la forêt (XVIIe - XXe siècle). Paris : Fayard.

Corvol, A., 2006. Tempêtes sur la forêt française : XVIe - XXe siècle. Paris : L'harmattan.

Crew, P., Salter, C., 1991. «Comparative data from iron smelting and smithing experiments.» *Nosek,* pp 15–22.

Crouzevialle, R., Faucher, A., 2006. « L'arbre et la forêt en Limousin du Haut Moyen Age à la Révolution industrielle », in Allée (dir) *PCR : Géoarchéologie et Géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. 62–65.

Crouzevialle, R., Paradis, S., 2008. « Forges et forêts en Périgord Limousin : l'élaboration d'une base de données», in Allée (dir). *PCR : Géoarchéologie et Géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. 70–74.

Crouzevialle, R., Paradis-Grenouillet, S., 2009. « Métallurgie du fer et forêts en Périgord Limousin : l'élaboration d'une base de données », in Allée (dir). *PCR : Géoarchéologie et Géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. 175–184.

Dabosi, F., 2004. « La forge à la catalane », in Mangin (éd.). *Le Fer*. Paris : Errance, pp. 75–77.

Davasse, B., 1992a. « Aspects méthodologiques de l'anthraco-analyse des charbonnières. Histoire des forêts de la vallée de Soulcem (Pyrénées ariégeoise, France) », in Métailié J.P. (éd). *Proto-industries et histoire des forêts*. Toulouse : Les cahiers de l'ISARD, pp. 207–221.

Davasse, B., 1992b. « Anthracologie et espaces forestiers charbonnés. Quelques exemples dans la moitié orientale des Pyrénées », in Métailié (éd.). *Les Charbons de bois, les anciens écosystèmes et le rôle de l'homme : colloque organisé à Montpellier du 10 au 13 septembre 1991*, Actualité botanique. Montpellier : Société Botanique de France, pp. 579–586.

Davasse, B., 1999. La forêt du charbonnier et les forêts des paysans dans l'espace des Pyrénées de l'Est (Moyen-Age à nos jours) : Etude d'écologie historique, aspects biogéographique, écohistorique et anthracologique. Contribution à une histoire de l'environnement. Université de Toulouse. Thèse de doctorat.

Davasse, B., 2000. Forêts, charbonniers et paysans dans les Pyrénées de l'Est du Moyen âge à nos jours : une approche géographique de l'histoire de l'environnement. Toulouse : GEODE.

Dejean, P., 1927. « L'évolution à travers les âges de la métallurgie dans le sud-est de la France ». *Alpes économiques.*

Delhoume, J.-P., 2006. « Groupes sociaux et propriété dans la châtaigneraie Limousine au milieu du XVIIIe siècle », in Allée (dir). *PCR : Géoarchéologie et Géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. pp. 143–150.

Delhoume, J.-P., 2011. « Forêts et usage du bois en Haute-Vienne : un bilan en 1808», in Rouaud (dir). *PCR : Géohistoire et Géoarchéologie de la forêt combustible en limousin et Poitou-Charentes*. Limoges : SRA Limousin, pp. 11–32.

Devèze, M., 1961a. La vie de la forêt française au XVIe siècle. Tome I. Paris : SEVPEN.

Devèze, M., 1961b. La Vie de la forêt française au XVIe siècle. Tome II, Paris : SEVPEN.

Devèze, M., 1973. Histoire des forêts. Paris : Presse Universitaire de Paris, Que sais-je ?.

Dieudonné-Glad, N., 2010. « L'atelier de réduction du Latté à Oulches », in Dumasy (éd.) *Travail De La Terre, Travail Du Fer* Bordeaux : Ausonius, pp. 262–366.

Domergue, C., 2004. « Fer et société », in Mangin (éd.). *Le Fer*. Paris : Errance, pp. 175–213.

Domergue, C., 2008. Les mines antiques : la production des métaux aux époques grecque et romaine, Paris : Picard.

Domergue, C., Cauuet, B., Lavielle, E., Paillier, J.-M., Sablayrolles, R., Sillières, P., 1993. « Un centre sidérurgique romain de la Montagne Noure, le domaine des Forges (les Martys, Audes) ». *Revue Archéologique de Narbonnaise*.

Domergue, C., Leroy, M., 2000. « L'état de la recherche sur les mines et les métallurgies en Gaule, de l'époque gauloise au haut Moyen Age ». *Galia*, 57, pp 3–10.

Dorigny, M., 1989. « Usages forestiers communautaires et demandes proto-industrielles dans l'Autunois. L'esquisse d'un conflit à travers les cahiers de doléance s», in Woronoff D. (éd.). *Révolution et espaces forestiers. Colloque des 3 et 4 juin 1987*. Paris : l'Harmattan, pp. 28–36.

Dornic, F., 1984. Le Fer contre la forêt. Rennes : Ouest France université.

Doyen, J.., Malinverno, B., 1988. L'ancienne métallurgie dans le département des Vosges. Images du Patrimoine.

Dubois, C., 1991. « Charbonnières et archéologie », in Métailié J.P. et Jalut G. (dir). *Rapport PIREN : La forêt charbonnée. Histoire des forêts et impact de la métallurgie dans les Pyrénées ariégeoises au cours des deux derniers millénaires*. Toulouse : Centre National de la Recherche Scientifique, pp. 62–69.

Dubois, C., 1992. « De la forêt au métal : premières données diachroniques et archéologiques en Ariège », in Métailié (éd.). *Proto-industries Et Histoire Des Forêts*. Toulouse : Les cahiers de l'ISARD, pp. 287–300.

Dubois, C., 2000. « Lercoul (Pyrénées ariégeoises) : un site sidérurgique du IIIe siècle de notre ère ». *Gallia*. pp. 53–62.

Dubois, C., 2004. L'industrie minière du zinc en France mi XIXe siècle à mi XXe siècle : le cas de la mine de Sentein, Pyrénées ariégeoises. Université de Toulouse. Thèse de doctorat.

Dubois, C., Pizano, L., 1999. « La forge de Savignac-Lédrier (Dordogne) - L'apport des fouilles archéologiques ». *L'archéologie Industrielle en France*.

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. Université de Besançon. Thèse de doctorat.

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

Dufraisse, A., Garcia-Martinez, M.S., 2011. « Mesurer les diamètres du bois de feu en anthracologie ». *Anthropobotanica*, 1, pp. 1–18.

Duhamel du Monceau, 1774. « L'art du charbonnier », in *Description des arts et métiers. Tome I*I. Neuchâtel : Imprimerie de la Société typographique, pp. 645–707.

Duhamel Du Monceau, H.-L., 1764. De l'exploitation des bois, ou moyens de tirer un parti avantageux des taillis demi-futaies et hautes-futaies, et d'en faire une juste estimation. Avec la description des arts qui se pratiquent dans les forêts. Paris : chez H.L. Guérin et L.F. Delatour.

Dumasy, F., Dieudonné-Glad, N., Laüt, L., 2010. Travail de la terre, travail du fer : l'espace rural autour d'Argentomagus, Saint Marcel (Indre). Bordeaux : Ausonius.

Duncan, R., 1989. « An evaluation if errors on tree age estimates based on increment cores in kahikatea (Dracrycarpus dacrydiodes) ». *New Zealand Natural Sciences*, pp 31–37.

Dunikowski, C., Cabboi, S., 1995. La sidérurgie chez les Sénons : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois, Yonne. Paris : Maison des sciences de l'homme.

Durrens, R., 2011. Histoire de la cartographie en Périgord. Le Périgord à travers les cartes depuis le XVIe siècle jusqu'au XXe siècle. Université de Limoges. Thèse de doctorat.

Duval, J.-F., 2000. Métallurgie et défrichement en forêt de Paimpont au Moyen Âge. *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest*. pp. 7–24.

Eschenlohr, L., Serneels, V., 1991. Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, les Bouilies (Ju, Suisse), Porrentruy : Cahier d'archéologie jurassienne.

Euba, I., 2008. Análisis antracológico de estructuras altimontanas en el Valle de La Vansa-Sierra del Cadi (Alt Urgell) y en el Valle del Matriu (Andorra): explotación de recursos forestales del Neolítico a la época moderna. Université de Tarragone. Thése de doctorat.

Euba-Rementeria, I., Allée, P., 2009. Etude archéobotanique de la forêt de la châtaigneraie Limousine, in Allée (dir). *PCR : Géoarchéologie et Géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. 133–172.

Euba-Rementeria, I., Rouaud, R., 2010. Sondage de trois ferriers et six plateformes de charbonnage en forêt de la Braconne. Rapport de sondage. Limoges : SRA Poitou Charente.

Fabre, L., 1992. Le Charbonnage historique en région méditerranéenne française : approche expérimentale et anthracologique. Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc. Thèse de doctorat.

Fabre, L., 1996. Le charbonnage historique de la chênaie à "Quercus ilex L." (Languedoc, France) : conséquences écologiques (Thèse de doctorat).

Fabre, L., Gervet, X., 1992. « Première approche du charbonnage et de l'histoire de la forêt méditerranéenne : l'exemple du canton d'Aniane (Hérault) », in Métailié J.P. (éd.). *Les Charbons de bois, les anciens écosystèmes et le rôle de l'homme : colloque organisé à Montpellier du 10 au 13 septembre 1991*. Montpellier : Société Botanique de France, pp. 617–625.

Fisher, R., 1936. « The use of multiple measurements in taxonomic problems ». *Annals of eugenics*, 7, pp 179-188.

Francovich, R., Dallai, L., 2010. « Colline Metallifere (Tuscany, Italy) ». *ArchéoSciences*, n°34, pp 277–287.

Fruhauf, C., 1992. « Forge et charbonnage dans les forêts du Capcir (Pyrénées de l'Est) dans la seconde moitié du XVIIIe siècle », in Métailié J.P. (éd.). *Proto-industries Et Histoire Des Forêts*. Toulouse : Les cahiers de l'ISARD, pp. 85–95.

Galop, D., 1998. La forêt, l'homme et le troupeau : six millénaires d'anthropisation du massif pyrénéen de la Garonne à la Méditerranée : contribution palynologique à l'histoire de l'environnement et du paysage pyrénéens. Université de Toulouse. Thèse de doctorat.

Galop, D., Monna, F., Beyrie, A., Carozza, L., Parent, G., 2006. « Activités métallurgiques et environnement en vallée de Baïgorry (Pyrénées-Atlantiques): une approche interdiscipliaire». *Préhistoire du bassin de l'Adour*. pp 277–303.

Garçon, A.-F., 2011. «Pratique, technique, technologie ?», *ArchéoSciences*, n°34, pp 121–126.

Garnier, E., 2004. Terre de conquêtes : la forêt vosgienne sous l'Ancien régime. Paris : Fayard.

Georlette, R., 1957a. « Quelques aspects de l'histoire des forêts françaises, depuis la fin du Moyen Age jusqu'à la promulgation de l'Ordonnance de 1669 ». *Revue Forestière Française*, pp. 113–127.

Georlette, R., 1957b. « Abrégé de l'histoire des forêts françaises, depuis la promulgation de l'ordonnance de 1669 jusqu'à la veille de la Révolution ». *Revue Forestière Française*. pp. 403–418.

Gille, B., 1960. Les forges françaises en 1772. Paris : SEVPEN.

Girard, J., Munoz, M., Cauuet, B., Polve, M., Aries, S., Callegarin, L., 2011. « Mines d'argent du Montaigu (Hautes-Pyrénées, France) », *ArchéoSciences*, n°34, pp. 235–242.

Glomot, D., 2009. « Héritage de serve condition ». Une société et son espace : la Haute Marche à la fin du Moyen Age. Université de Toulouse. Thèse de doctorat.

Glomot, D., Crouzevialle, R., 2008. « La Haute-Marche, une province peu forestière au XVe siècle », in Allée (dir). *PCR : Géoarchéologie et Géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. 10–16.

Groupe d'histoire des forêts françaises, 1982. Histoire des forêts françaises, guide de recherche. Paris : IHMC-CNRS.

Guillabot, M., 2006. Forêts privées et développement durable des territoires ruraux. L'exemple de la forêt limousine dans les parcs naturels régionaux Périgord - Limousin et Millevaches. Université de Limoges. Thèse de doctorat.

Henry, A., 2011. Paléoenvironnements et gestion du bois de feu au Mésolithique dans le Sud-Ouest de la France : anthracologie, ethni-archéologie et expérimentation. Université de Nice-Sophia Antipolis. Thèse de doctorat.

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.

Houzard, G., 1980. Les massifs forestiers de Basse-Normandie Brix, Andaines et Écouves : Essai de biogéographie. Université de Caen. Thèse d'Etat.

Houzard, G., Hoyau, H., Martinetti, J.-L., 1983. A la découverte du massif forestier de Perseigne. Caen : Centre de recherches sur l'évolution de la vie rurale

Husson, J.-P., 1995. Les forêts françaises. Nancy : Presses universitaires de Nancy.

Izard, V., 1992a. « L'art du charbonnier : contributions éthno-botanique et géographico-historique à l'étude des paysages métallurgiques d'après l'anthracoanalyse des charbonnières», in Métailié J.P. (éd.). *Les Charbons de bois, les anciens écosystèmes et le rôle de l'homme : colloque organisé à Montpellier du 10 au 13 septembre 1991*. Montpellier: Société Botanique de France, pp. 579–586.

Izard, V., 1992b. « La typologie des charbonnières : méthode d'inventaire pour l'étude diachronique du charbonnage », in Métailé J.P. (éd.); *Proto-industries et histoire des forêts*. Toulouse : Les cahiers de l'ISARD, pp. 223–235.

Izard, V., 1999. Les montagnes du fer : éco-histoire de la métallurgie et des forêts dans les Pyrénées méditerranéennes (de l'Antiquité à nos jours). Pour une histoire de l'environnement. Université de Toulouse. Thèse de doctorat.

Jacquiot, C., Trenard, Y., Dirol, D., 1973. Atlas d'anatomie des bois des angiospermes (essences feuillus). Versailles : Centre Technique du bois.

Jalut, G., Métailié, J.P., 1991. Rapport PIREN. La forêt charbonnée : histoire des forêts et impact de la métallurgie dans les Pyrénées ariégeoises au cours des deux derniers millénaires. Toulouse : Centre National de la Recherche Scientifique.

Jouffroy-Bapicot, I., 2010. Evolution de la végétation du massif du Morvan (Bourgogne - France) depuis la dernière glaciation à partir de l'analyse pollinique : Variations climatiques et impact des activités anthropiques. Université de besançon. Thèse de doctorat.

Kiéthéga, J.-B., 2009. La métallurgie lourde du fer au Burkina Faso : une technologie à l'époque précoloniale. KARTHALA Editions.

Kleitz, T., 2008. Atlas des paysages du Parc national des Cévennes. Parc national des Cévennes, Florac.

Krauss-Marguet, I., 1981. Analyse anthracologique du gisement postglaciare de la Poujade (Millau, Aveyron). *Paléobiologie continentale*, XII, pp. 93–110.

Lacour, M., 2009. Les industries rurales du Nontronnais (vers 1450 - vers 1860), approches historique et archéologique. Université de Poitiers. Mémoire de master II.

Lamy, M.-L., Lamy, Y., 1992. Forges en Périgord. 1, La vallée de la Dronne et ses affluents. Le Bugue : Collection Centaurée.

Lamy, Y., 1984. Travail du fer, propriétés foncières, sociétés paysannes en Périgord, 1789-1930. L'exemple de la forge de Savignac-Lédrier. Paris. Thèse de doctorat.

Lamy, Y., 1987. Hommes de fer en Périgord au XIXe siècle. Lyon : La Manufacture.

Larcher, G., 1986. « Les Charbonniers à Paimpont : contribution à l'histoire d'une commune», *Association des amis du moulin du Châtenay*, Rennes.

Laurent, S., 2005. Mines et métallurgie du plomb argentifère sur le mont Lozère au Moyen Age. Université de Lyon 2. Mémoire de maîtrise

Leroy, M., 1993. La sidérurgie ancienne en Lorraine avant le haut fourneau : étude du développement historique et des conditions techniques de l'utilisation du minerai oolithique Lorrain (la minette), en métallurgie de réduction directe. Nancy. Thèse de doctorat.

Leroy, M., Merluzzo, P., 1999. « Les ateliers sidérurgiques médiévaux de Saint-Dizier (Haute-Marne) ». *Société archéologique champenoise*, Reims.

Levainville, J., 1922. L'industrie du fer en France. Paris : A. Colin.

Lhullier, S., 1999. Inventaires des sites à scories du mont Lozère. Rapport de stage au Parc National des Cévennes.

Liard, M., Julia, R., Bal-Serin, M.-C., 2011. « Histoire des pratiques agro-pastorales, des sols, des feux et de la nardais sur le mont Lozère depuis le Néolithique », in Allée (dir.). *PCR: Pratiques et mobilités territoriales sur le mont Lozère depuis le Néolithique*. Mende : SRA Languedoc-Roussillon, pp. 117–124.

Loreau, P., 1994. Du bois au charbon de bois : approche expérimentale de la combustion. Université dé Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, Mémoire de Maîtrise.

Ludemann, T., 2002. « Anthracology and forest sites - the contribution of charcoal analysis to our knowledge of natural forest vegetation in south-west Germany », in Thiébaut (éd.). *Charcoal Analysis. Methological Approaches, Palaeoecological Results and Wood Uses. Proccedings of the Second International Metting of Anthracology.* Paris : British Archaeological Report Serie 1063, pp. 209–217.

Ludemann, T., 2003. "Large-scale reconstruction of ancient forest vegetation by anthracology - A contribution from the Black Forest». *Phytocoenolgia*, 33, pp.645–666.

Ludemann, T., 2006. « Anthracological analysis of recent charcoal-burning in the Black forest, SW Germany », in Dufraisse (éd.). *Charcoal Analysis: New Analytical Tools and Methods for Archaeology. Papers from the Table Ronde Held in Basel*. Basel : British Archaeological Report Serie 1063, pp. 61–70.

Ludemann, T., 2008. « Experimental charcoal-burning with special regard to charcoal wood diameter analysis". *Presented at the Charcoals from the past : cultural and palaeoenvironmental implications*. Lecce : BAR International Series, pp. 147–158.

Ludemann, T., 2010. « Past fuel wood exploitation and natural forest vegetation in the Black Forest, the Vosges and neighbouring regions in western Central Europe ». *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecolgy,* 291, pp.154–165.

Ludemann, T., Michiels, H., Nolken, W., 2004. « Spatial patterns of past wood exploitation, natural wood supply and growth conditions: indications of natural tree species distribution by anthracological studies of charcoal-burning remains ». European Journal of forest research, 123, pp. 283–292.

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

Magne, C., 2004. Au temps où le Périgord-Limousin-Angoumois canonnait en Atlantique : du fer et des canons pour sa Majesté. Varaignes : CPIE du Périgord-Limousin.

Mangin, M., 2004. Le fer, Archéologiques. Paris : Éd. Errance.

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,* 412.

Marguerie, D., Hunot, J.-Y., 2007. « Charcoal analysis and dendrology: data from archaeological sites in north-western France ». *Journal of Archaeological Sciences*, 34, pp. 1417–1433.

Marque, R., 2007. Une première approche de la gestion du bois dans le fonctionnement de la chaîne opératoire en sidérurgie mérovingienne : étude anthracologique du site de Messein les Noires Terres (VIe et VIIe siècles), Lorraine. Université de Nanterre. Mémoire de master II.

Métailié, J.P., 1992. « Anthracologie, proto-industries et nouvelles perspectives en histoire des forêts », in Métailié (éd.) *Les Charbons de bois, les anciens écosystèmes et le rôle de l'homme : colloque organisé à Montpellier du 10 au 13 septembre 1991*. Montpellier : Société Botanique de France, pp. 579–586.

Métailié, J.P., 1992. Proto-industries et histoire des forêts : actes du colloque tenu à la Maison de la forêt, Loubières, Ariège, les 10-13 octobre 1990. Toulouse : Les Cahiers de l'ISARD.

Métailié, J.-P., Jalut, G., 1991. Rapport Piren. Histoire des forêts et impact de la métallurgie dans les Pyrénées ariégeoises depuis deux millénaires. Toulouse : Centre National de la Recherche Scientifique.

Mohen, J.-P., 1990. Métallurgie préhistorique : introduction à la paléométallurgie, Collection Préhistoire. Paris : Masson.

Monna, F., Petit, C., Guillaumet, J.P., Jouffroy-Bapicot, I., Blanchot, C., Dominik, J., Losno, R., Richard, H., Chateau, C., 2004. « History and environmental impact of mining activity in Celtic Aeduan territory recorded in a peat-bog (Morvan - France) ». *Environmental Science and Technology*, 38, pp. 657–673.

Morel, C., Bardy, B., 1957. « Fouilles et recherches en Lozère. Campagne 1957 ». *Bulletin de la société des Lettres et des Arts de la Lozère*. pp. 3–29.

Morin, D., Rosenthal, 2006. « Etude diachronique des traces d'exploitation et de traitement du minerai, de la Gaule Romaine au XXe siècle », in Jacob J.P (éd.). *4000 Ans D'histoire Des Mines. L'exemple De La Région Provence-Alpes-Côte-d'Azur*. Theix : Actillia multimédia, pp. 113–133.

Musset, D., 1996. De mémoire de charbonniers. Mane : Les Alpes de lumière.

Nelle, O., 2002. « Charcoal burning remains and forest stand structure - Example from the Black Forest (south-west-Germany) and Bavarian Forest (south-east-Germany) », in Thiébault S. (éd.). *Charcoal Analysis. Methological Approaches, Palaeoecological Results and Wood Uses. Proccedings of the Second International Metting of Anthracology.* Paris : British Archaeological, pp. 201–207.

Nogues, A., 1980. Les anciennes forges du Périgord.

Norton, D.., Palmer, J.G., Ogden, J., 1987. « Dendroecological studies in New-Zealand. An evaluation of tree age estimates based on increment cores ». *New zealand journal of botany,* 25, pp 373–383.

Oillic, J.-C., 2011. Végétation, peuplement, métallurgie en Brocéliande : étude interdisciplinaire de la forêt de Paimpont (Bretagne, France) depuis la fin du Tardiglaciaire. Université de Rennes. Thèse de doctorat.

Orengo-Romeu, H., Palet-Martinez, J.M., Garci-Molsosa, A., 2011. « Archéologie pastorale: sondage et prospection pédestre », in Allée (dir). *PCR : Pratiques et mobilités territoriales sur le mont Lozère depuis le Néolithique*. Mende : SRA Languedoc-Roussillon, pp. 47–76.

Paradis, S., 2007. Etude dendro-anthracologique : une approche méthodologique pour l'étude du calibre des bois. Application sur des charbonnières médiévales du mont Lozère (France, 48) Université de Bourgogne, Dijon. Mémoire de master II.

Paradis-Grenouillet, S., Allée, P., Rouaud, R., 2010. « La forêt charbonnée : une approche archéobotanique », in Allée (dir). *PCR : Pratiques et mobilités territoriales sur le mont Lozère depuis le Néolithique*. Mende : SRA Languedoc-Roussillon, pp. 43–65.

Paradis-Grenouillet, S., Crouzevialle, R., 2010. « De la base de données aux stratégies d'approvisionnement en combustible pour la métallurgie en Périgord Limousin (XVIIIe et XIXe siècles) », in Rouaud (dir). *PCR : Géohistoire et Géoarchéologie de la forêt combustible en Limousin et Poitou-Charentes*. Limoges : SRA Limousin, pp. 35–58.

Paradis-Grenouillet, S., Dufraisse, A., Allee, P., sous presse. « Radius of curvature measurements and wood diameter: a comparison of different image analysis techniques», in Damblon (éd.). *4th Internation Meeting of Anthracology in Brussels*. Brussels : British Archaeological Report Serie 1063.

Paradis-Grenouillet, S., Rouaud, R., 2009. De la charbonnière à la forêt combustible: apport de l'expérimentation, poster. Montpellier : GMPCA.

Paradis-Grenouillet, S., Rouaud, R., Allée, P., Euba-Rementeria, I., 2009. « De la charbonnière à la forêt combustible: l'apport de l'expérimentation » , in Allée (dir). *PCR : Géoarchéologie et Géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousins, pp. 143–150.

Pardé, J., Bouchon, J., 1988. Dendrométrie. Nancy : École nationale du génie rural, des eaux et des forêts. 2e édition.

Pelet, P.-L., 1993. Une industrie reconnue. Lausanne : Cahiers d'archéologie romande.

Pelet, P.-L., Carvalho, B. de, Decollogny, P., 1973. Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud: les sources archéologiques. Lausanne : Impr. Presses Centrales.

Pelletier, M., 2002. Les cartes des Cassini : la science au service de l'État et des régions. Paris : Éd. du CTHS.

Perpillou, A., 1940. Cartographie du paysage rural limousin : Essai d'utilisation rationnelle des documents cadastraux.

Peyre, P., 1986. « Les forges de Buffon ». *Dossiers histoire et archéologie*, n°107, pp. 53–57.

Peyronnet, E., 1958. Les anciennes forges de la région du Périgord. Bordeaux : Delmas.

Peyrony, J.-G., 2001. « La métallurgie antique aux confins du Périgord et du Limousin : l'exemple du Piégutais ». *Travaux d'Archéologie Limousine*. pp. 63–72.

Pierre, F., Gaxatte, J.-P., 2011. Les dessins des mines d'argent de la Croix. La Croix-aux-mines : Les éditions de la Stingelle.

Pijassou, R., 1954. L'ancienne industrie du fer en Nontronnais du XVIIe à la fin du XIXe siècle. Bordeaux : Etude de Géographie humaine et économique.

Plaisance, G., 1989. Les revendications forestières dans les cahiers de doléances en Bourgogne, in Woronoff (éd.). *Révolution et espaces forestiers. Colloque des 3 et 4 juin 1987*, Paris : l'Harmattan, pp. 23–27.

Planckoucke, C.-J., Plomteux, C., 1782. Encyclopédie méthodique : Arts et métiers mécaniques . Paris : chez Panckoucke libraire.

Plas, P., Boumédiène, F., 2010. « Les évolutions de la Châtaigneraie Limousine depuis la fin du XVIIIe à nos jours », in Grand Coing (éd.) *Paysage et Environnement en Limousin, de l'Antiquité à nos Jours*. Limoges : PULIM.

Ploquin, A., Allée, P., Bailly-Maître, M.-C., Baron, S., De Beaulieu, J.-L., Carignan, J., Laurent, S., Lavoie, M., Mahé Le Carlier, C.M., Paradis, S., Peytavin, J., Pulido, M., 2011. «PCR – Le Plomb argentifère ancien du mont Lozère (Lozère)». *ArchéoSciences*, n°34, pp. 99–114.

Ploquin, A., Bailly-Maître, M.-C., Allée, P., 2002. Le plomb argentifère ancien du mont Lozère. A la recherche des mines, des minerais et des ateliers, des paysages et des hommes (PCR). Mende : SRA Languedoc Roussillon.

Ploquin, A., Bailly-Maître, M.-C., Allée, P., 2003. Le plomb argentifère ancien du mont Lozère. A la recherche des mines, des minerais et des ateliers, des paysages et des hommes (PCR). Mende : SRA Languedoc Roussillon.

Ploquin, A., Bailly-Maître, M.-C., Allée, P., 2004. Le plomb argentifère ancien du mont Lozère. A la recherche des mines, des minerais et des ateliers, des paysages et des hommes (PCR). Mende : SRA Languedoc Roussillon.

Ploquin, A., Bailly-Maître, M.-C., Allée, P., 2005. Le plomb argentifère ancien du mont Lozère. A la recherche des mines, des minerais et des ateliers, des paysages et des hommes (PCR). Mende : SRA Languedoc Roussillon.

Ploquin, A., Bailly-Maître, M.-C., Allée, P., 2006. Le plomb argentifère ancien du mont Lozère. A la recherche des mines, des minerais et des ateliers, des paysages et des hommes (PCR). Mende : SRA Languedoc Roussillon.

Ploquin, A., Bailly-Maître, M.-C., Allée, P., 2007. Le plomb argentifère ancien du mont Lozère. A la recherche des mines, des minerais et des ateliers, des paysages et des hommes (PCR). Mende : SRA Languedoc Roussillon.

Pouyet, E., 2009. Initiation à l'analyse anthracologique et étude du corpus du chantier de fouilles de Candesoubre. Université Denis Diderot, Paris. Mémoire de Licence 3.

Pulido Avila, M.G., 2006. Conséquences de l'anthropisation sur la dynamique postglaciaire de la végétation dans le sud du Massif Central, France. Université de Montpellier. Thèse de doctorat.

Py, V., 2006. « Mine charcoal deposists : methods and strategies. The medieval Fournel silver mines in the Hautes-Alpes (France) », in Dufraisse (éd.) *Firewood Economy : Analytical Tools and Methods. News Datas for Archaeology and Study of Societis, Techniques and Land Uses*. Basel : British Archaeological Report Serie 1063 pp. 35–46.

Py, V., 2009. Mine, bois et forêt dans les Alpes du sud au Moyen Age. Approches archéologique, bioarchéologique et historique. Université de Aix en Provence. Thèse de doctorat.

Queuille, K., 2011. L'impact de l'activité métallurgique et du charbonnage sur le couvert arboré de la forêt domaniale de la Braconne (Charente). Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II. Mémoire de master I.

Queuille, K., 2012. L'impact de l'activité métallurgique et du charbonnage sur le couvert arboré de la forêt domaniale de la Braconne (Charente). Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand II. Mémoire de master I.

Rassat, G., 2010. L'occupation du sol dans la forêt de la Braconne et ses marges (Charente) aux époques antique et médiévale. Université de Poitiers. Mémoire de master II.

Rassat, G., 2011. Rapport de sondage. L'occupation du sol dans la forêt de la Braconne et ses marges (Charente) aux époques antique et médiévale. Université de Poitiers. Mémoire de master I.

Rassat, G., 2012. Sondages archéologiques d'un ferrier et d'une plateforme de charbonnage (1er et 13 août 2011), commune de Saint-Projet-Saint-Constant, parcelle ONF 150. Poitiers: SRA Poitou Charente

Reille, M., 1990. Leçons de palynologie et d'analyse pollinique. Paris : Ed. du CNRS.

Rouaud, R., 2007. « La forêt combustible de la vallée de la Dordogne », in Allée (dir). *PCR : Géoarchéologie et Géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. 47–56.

Rouaud, R., 2009. « Le charbonnage dans les forêts de pente de la Haute vallée de la Dordogne », in Allée (dir). *PCR : Géoarchéologie et Géohistoire des territoires forestiers limousins*. Limoges : SRA Limousin, pp. 117–139.

Rozas, V., 2003. « Tree age estimates in Fagus sylvatica and Quercus robur: testing previous and improved methods ». *Plant ecology,* 167, pp. 193–212.

Sarreste, F., 2008. La sidérurgie ancienne dans le Bas Maine (VIIIe s. av. J.-C. - XVe s. ap. J.-C.). Université de Tours. Thèse de doctorat.

Schlosser, C., 2004. Les charbonniers. Lembach : Imprimerie Brendel,.

Schweingruber, F.H., 1978. Anatomie microscopique du bois : identification de matériel récent et subfossile d'essences de l'Europe centrale en tenant compte de la variabilité de structure du bois de tronc et de branche. Birmensdorf : Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen.

Schweingruber, F.H., Börner, A., Schulze, E.-D., 2011. Atlas of Stem Anatomy in Herbs, Shrubs and Trees. Berlin : Springer e-books.

Servera-Vives, G., Miras, Y., Riera Mora, S., Allée, P., 2010. «Dynamique de végétation et interactions socio-environnementales : approches multi-indicateurs sur des séquences tourbeuses naturelles», in Allée (dir). *PCR : Pratiques et mobilités territoriales sur le mont Lozère depuis le Néolithique*. Mende : SRA Languedoc-Roussillon, pp. 69–84.

Servera-Vives, G., Miras, Y., Riera Mora, S., Allée, P., 2011. « Histoire Holocène de la végétation et évolution des activités agrosylvopastorales sur le mont Lozère depuis le Néolithique à partir de l'analyse palynologique (grains de pollen et microfossiles non polliniques », in Allée (dir). *PCR : Pratiques et mobilités territoriales sur le mont Lozère depuis le Néolithique*. Mende : SRA Languedoc-Roussillon, pp. 77–112.

Tamas, C., Baron, S., Cauuet, B., 2009. « Minéralogie et signature isotopique du plomb des minerais auro-argentifères exploités durant l'époque romaine à Alburnus Maior (Rosia Montanà, Roumanie) ». *ArchéoSciences,* n° 33, pp. 83–89.

Théry-Parisot, I., 2001. Economie des combustibles au Paléolithique : expérimentation, taphonomie, anthracologie. Paris : CNRS.

Théry-Parisot, I., Chrzavzez, J., Henry, A., Paradis-Grenouillet, S., 2011. « Charcoal analysis and wood diameter : indictive and deductive methodological approaches for the study of firewood collecting practices », In : E. Badal, Y. Carrion, E. Grau, M. Garcia , M. Ntinou (éds), *Ve International Meeting of charcoal analysis. The charcoal as cultural and biological heritage*. Valencia : *Saguntum*. pp. 31–32.

Thiébault, S., 2010. Archéologie environnementale de la France. Paris : Editions La Découverte.

Thinon, M., 1992. L'analyse pédoanthracologique : aspects méthodologiques et applications. Université de Montpellier. Thèse d'Etat.

Tylecote, R.F., Austin, J.N., Wraith, A.E., 1971. «The mecanism of the bloomery process in schaft furnaces». *Journal if the Iron and Steel Institute*, pp. 342–363.

Vallauri, D., Grel, A., Granier, E., Dupouey, J.-L., 2012. Les forêts de Cassini. Analyse quantitative et comparaison avec les forêts actuelles (Rapport WWF/INRA). Marseille : WWF/INRA.

Vallet, P., Levesque, C., Ginisty, C., 2007. Biomasse forestière disponible pour de nouveaux débouchés énergétiques et industriels (Rapport du Cemagref). Nogent-sur-Vermisson : Cemagref.

Vaschalde, C., 2011. « Vitrification and craft fire in occidental Mediterranean. Describing characteristics, first results and research hypothesis », in E. Badal, Y. Carrion, E. Grau, M. Garcia , M. Ntinou (éds), *Ve International Meeting of charcoal analysis. The charcoal as cultural and biological heritage*. Valencia : *Saguntum*. pp. 19–20.

Verna, C., 1994. Le temps des moulines : le fer et son exploitation du comté de Foix à la vicomté de Béarn (fin du XIIe siècle - fin du XVe siècle). Université de Toulouse. Thèse de doctorat.

Verna, C., 2001. Le temps des moulines : Fer, technique et société dans les Pyrénées centrales, XIIIe-XVIe siècles. Paris : Publications de la Sorbonne.

Vernet, J.-L., Ogereau, P., Figueiral, I., 2001. Guide d'identification des charbons de bois préhistoriques et récents : sud-ouest de l'Europe : France, péninsule ibérique et îles Canaries. Paris : CNRS Éd.

Vion-Delphin, F., 1989. « Forêts et cahiers de doléances : l'exemple de la Franche-Comté», in Woronoff (éd.). *Révolution et espaces forestiers. Colloque des 3 et 4 juin 1987*. Paris : l'Harmattan.

Vivet, J.-B., Bacheter, X., Chauvel, J.-J., Fluzin, P., 2009. « Métallurgie médiévale et forêt en prélude aux Grandes Forges de Paimpont (35) », *Les Dossiers du Centre régional archéologique d'Alet*. Numéro spécial, Alet : Centre régional d'archéologie.

Willerding, U., 1971. Methodische probleme bei der Untersuchung und Auswertung von Pflanzenfunden. Und frühgeschichtlichen Siedlungen - Narchr. aus Neidersachsens Urgesch pp. 180–198.

Woronoff, D., 1981. L'Industrie sidérurgique en France pendant la Révolution et l'Empire. Paris 1. Thèse de doctorat.

Woronoff, D., 1984. « Forges prédatrices, forges protectrices ». *Revue de Géographie des Pyrénées et du Sud-Ouest*, pp. 213‑218.

Woronoff, D., 1989a. Révolution et espaces forestiers. Paris : l'Harmattan, pp. 44‑62.

Woronoff, D., 1989b. « La dévastation révolutionnaire des forêts », in Woronoff (éd.). *Révolution et espaces forestiers. Colloque des 3 et 4 juin 1987*. Paris : l'Harmattan, pp. 44‑62.

Woronoff, D., 1990a. Forges et forêts : recherches sur la consommation protoindustrielle de bois. Paris : Éd. de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales.

Woronoff, D., 1990b. « La politique des autorisations d'usines et la question du bois », in Woronoff (éd.). *Forges Et Forêts : Recherches sur la Consommation Protoindustrielle de Bois*. Paris : Éd. de l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales, pp. 57‑85.

Woronoff, D., 1990c. « Histoire des forêts françaises, XVIe - XXe siècles. Résultats de recherche et perspectives », *Les Cahiers du Centre de Recherches Historiques*.

Woronoff, D., 2003. La France industrielle : gens des ateliers et des usines, 1890-1950. Paris: Editions du Chêne

Sommaires des figures

Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude, située aux confins du Périgord et du Limousin 59

Figure 2 : A) Forge de Savignac Lédrier, B) Forge Neuve, C) Forge de la Rivière. (Clichés S. Paradis-Grenouillet) 69

Figure 3 : Carte de localisation des établissements sidérurgiques 71

Figure 4 : Présentation de la base de données. A : Page d'accueil. B : Extrait du formulaire d'informations générales avec la localisation de chaque établissement. C : Extrait du formulaire « détails chronologiques ») 77

Figure 5 : Synthèse de l'ensemble des unités de mesures anciennes avec leur valeur dans le système métrique actuel. A : Unité de distance et de surface. B : unité de volume. C : Détail des cordes et des brasses observées dans le secteur du Périgord Limousin et mentionnées par Peyronnet (1958) 80

Figure 6 : Mode de calcul de l'intervalle de confiance en prenant en considération un écart type 81

Figure 7 : Synthèse des unités de masse retrouvées dans la bibliographie, principalement dans les ouvrages de Lamy 1987, Peyronnet 1958, et Pijassou, 1959) 82

Figure 8 : Cartes de présentation des données de production saisies dans la base de données pour les trois années les plus renseignées 1772, 1789 et 1811 84

Figure 9 : Schéma de synthèse permettant d'identifier les quatre ratios nécessaires à établir pour permettre une estimation des surfaces de bois indispensables au fonctionnement des forges 86

Figure 10 : Recensement et conversions des données mettant en relation la consommation de charbon de bois pour produire de la fonte (A et B) pour calculer le rendement moyen en Périgord Limousin (C) 88

Figure 11 : Recensement et conversions des données mettant en relation la consommation de charbon de bois pour produire du fer (A et B) pour calculer le rendement moyen en Périgord Limousin (C). 91

Figure 12 : Recensement et conversions des données de rendement « volume de bois / quantité de charbon » pour établir le rendement moyen des charbonnières. .. 94

Figure 13 : Graphique représentant l'évolution des rendements des taillis de feuillus en

fonction de l'âge. Le châtaignier a été séparé des autres feuillus en raison des rendements nettement supérieurs (d'après Vallet ***et al***., 2007)..... 99

Figure 14 : Mentions de rendements de taillis d'âges et d'essences différents..... 100

Figure 15 : Mise en place d'un ratio permettant d'évaluer le rendement moyen des taillis âgés de moins de 20 ans. 102

Figure 16 : Exemple d'une fiche de « récapitulation » de la commune de Saint Mesmin 109

Figure 17 : Données de production de fonte et de fer pour la forge de Savignac-Ledrier pour neuf années, évaluation de la consommation en charbon de bois, en bois et enfin estimation des surfaces de taillis consommées. 111

Figure 18 : Evaluation des surfaces de taillis consommées pour une année de fonctionnement moyenne. 113

Figure 19 : Carte de localisation des communes approvisionnant la forge de Savignac-Ledrier pour l'année 1872. 115

Figure 20 : Carte représentant les taux de boisement et la répartition en fonction des modes de gestion sylvicole sur les communes approvisionnant la forge de Savignac-Ledrier..... 116

Figure 21 : Présentation des données obtenues à l'issue de l'analyse des états de section sur 10 communes. 117

Figure 22 : De la « carte papier » au Système d'Information Géographique. A) Carte réalisée par Perpillou en 1940. B) Carte informatisée en utilisant les données de Perpillou (1940). 118

Figure 23 : Comparaison sur 13 communes des taux de boisement proposés par Perpillou (1940) avec ceux obtenus à partir de l'étude fine des cadastres napoléoniens. 119

Figure 24 : Aménagement d'une plateforme de charbonnage (schéma S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud) 132

Figure 25 : Iconographie représentant la construction des charbonnières en meule. (A), Duhamel du Monceau 1774, (B) Heinrich Gross (XVIe siècle) 135

Figure 26 : Construction de la meule. (A, B) la cheminée centrale, (C,D) l'agencement des bois sur plusieurs étages (clichés S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)..... 136

Figure 27 : Schématisation des différentes étapes de la carbonisation en meule (schéma S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)..... 137

Figure 28 : Couvrir la meule avec de la paille (A) puis de la terre (B) (clichés S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud). 138

Figure 29 : Allumage de la meule par dépôt de braises au fond de la cheminée (A , B) et début de carbonisation (C) (Cliché S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud)..... 140

Figure 30 : Lente carbonisation conduisant à l'affaissement de la meule (A, B). Exemple d'une ouverture dans la couverture conduisant à l'embrassement du charbon (C, D) (Clichés S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud) 141

Figure 31 : Etude de l'évolution des températures au sein des meules. (A) Présentation des résultats bruts pour chaque sonde. (B) Modélisation de quatre étapes de carbonisation. 143

Figure 32 : Ouverture de la meule (A). Ramassage des charbons de bois (B, C, D) (Clichés S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud) 145

Figure 33 : Images de plateformes de charbonnage en forêt ou en milieu ouvert (A, C, D). Localiser chaque plateforme (B) et relever les informations concernant les vestiges archéologiques et la végétation environnante (C, E) (Cliché S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud) 151

Figure 34 : Structure anatomique du bois. A : photographie de la coupe transversale d'un hêtre avec les cernes ondulés. B : vue macroscopique (Schweingruber, 1978) et C : vue microscopique 157

Figure 35 : Exemple d'une courbe « effort/rendement » (A) et d'un graphique d'évolution de fréquence (B) 158

Figure 36 : La carbonisation conduit à une fragmentation des bûches et donc à la formation de charbons ayant des rayons de courbure variés 160

Figure 37 : Exemple de cible graduée. A : (Dufraisse, 2002), B : (Nelle, 2002) 162

Figure 38 : Méthodes de mesure du rayon manquant. (A) Méthode mise au point par Rozas (2003) et (B) Méthode employée par Duncan (1989) 163

Figure 39 : Classes de rayons de courbure (Marguerie et Hunot, 2007) 163

Figure 40 : Schéma de synthèse expliquant les objectifs de l'expérimentation (extrait de Paradis-Grenouillet et Rouaud, 2009) 173

Figure 41 : (A) Photographies de la préparation des bois (Cliché S. Paradis-Grenouillet et R. Rouaud). (B) Extrait d'un tableur d'enregistrement de l'ensemble des bois 174

Figure 42 : (A) Photographie de la charbonnière aux gros diamètres en construction. (B) Proportions de volume des différentes essences mises dans chacune des meules 175

Figure 43 : Exemple de graphiques d'évolution de fréquence. (A) Secteur 4 de la charbonnière au mélange de diamètres. (B) Secteur 4 de la charbonnière aux petits diamètres. (C) Secteur 3 de la charbonnière aux petits diamètres 178

Figure 44 : Résultats de l'analyse anthracologique conduite sur les quatre secteurs prélevés sur la charbonnière aux petits diamètres 180

Figure 45 : Résultats de l'analyse anthracologique conduite sur les quatre secteurs prélevés sur la charbonnière aux gros diamètres 181

Figure 46 : Résultats de l'analyse anthracologique conduite sur les quatre secteurs prélevés sur la charbonnière présentant un mélange de diamètres 182

Figure 47 : (A) Comparaison des proportions connues avant la carbonisation avec les proportions obtenues à l'issue de l'analyse anthracologique en fonction du nombre, du volume et de la surface. (B). Tableaux de synthèse des pourcentages d'erreur..... 184

Figure 48 : Schéma de la chaîne opératoire sur les cibles parfaites et les sections de bois .. 193

Figure 49 : Explication de la méthode de mesure basée sur le théorème de Thalès..... 195

Figure 50 : Explication de la méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle rectangle inscrit dans le cercle. 196

Figure 51 : Explication de la méthode utilisant la trigonométrie dans un triangle rectangle dont la base est la tangente à l'arc de cercle correspondant au cerne étudié 197

Figure 52 : Explication de la méthode de mesure utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle 198

Figure 53 : Exemples de cibles parfaites 200

Figure 54 : Explicative de la relation entre la taille maximale des rayons de courbure potentiellement mesurable et la distance entre les rayons 202

Figure 55 : Comparaison des mesures réalisées sur les cibles parfaites et les sections de bois polies avec les longueurs de rayons théoriques et connus. 205

Figure 56 : Représentation de l'erreur associée à la mesure en valeur absolue (A) et en valeur relative (B), l'exemple des mesures réalisées avec la méthode de trigonométrie dans un triangle isocèle sur les sections de bois 207

Figure 57 : Evolution des pourcentages d'erreur en fonction du nombre de mesures réalisées à partir des quatre méthodes sur les cibles parfaites (A et C) et sur les sections de bois (B et D). 209

Figure 58 : Mise en évidence de l'influence de l'angle sur la précision de la mesure. Sur les graphiques sont représentées les proportions de mesures par classes de fiabilités sur sept classes d'angles entre les rayons. 212

Figure 59 : Evaluation de l'influence de la distance entre les rayons sur la précision de la mesure. 217

Figure 60 : Mise en évidence de l'influence de la longueur du rayon de courbure sur la précision de la mesure. 220

Figure 61 : Présentation de l'équipement (A) et des différentes fenêtres de l'application « AnthracoLoJ » (B, C, D). 225

Figure 62 : Explication de la position des points pour réaliser la mesure. 226

Figure 63 : Carbonisation des rondelles de bois dans un four de potier aux tuileries de Pouligny. (A) Section de bois. (B) four de potier chauffé au bois. (C) Foyer dans lequel sont placées les sections de bois. (D) Boite contenant les sections de bois. (E) Section de bois carbonisée 229

Figure 64 : Comparaison des mesures réalisées sur les sections de bois polies et les charbons de bois avec les longueurs de rayons connus. 230

Figure 65 : Evolution des pourcentages d'erreur en fonction du nombre de mesures réalisées à partir de la technique de mesure utilisant la trigonométrie dans un triangle isocèle. 231

Figure 66 : Evaluer l'influence de l'angle sur la précision de la mesure sur les sections de bois (A) et sur les fragments de charbon (B) 232

Figure 67 : Evaluer l'influence de la distance entre les rayons sur la précision de la mesure sur les sections de bois (a) et sur les fragments de charbon (b) 233

Figure 68 : Evaluer l'influence de la longueur du rayon sur la qualité de la mesure..... 234

Figure 69 : Comparaison des pourcentages d'erreur obtenus sur les sections de bois et sur les charbons permettant d'établir une valeur moyenne de l'erreur associée à la mesure..... 236

Figure 70 : Présentation des 5 classes de diamètres associées à des parties anatomiques d'un arbre, que l'on transpose par la suite en classe de rayon de courbure pour la construction des spectres dendro-anthracologiques 240

Figure 71 : Présentation des proportions de volume et de surface par classes de diamètre sur les trois charbonnières 241

Figure 72 : Explication de la chaîne opératoire pour mener une analyse comparative entre les proportions de diamètres connus dans les charbonnières et les résultats issus de l'analyse dendro-anthracologique..... 243

Figure 73 : Exemple de calcul des proportions de volume par classe de rayons pour une bûche de 20 cm de diamètre. 245

Figure 74 : Diagrammes obtenus à l'issue de la décomposition virtuelle des bûches en classes de cylindres creux. 247

Figure 75 : Comparaison des diagrammes de proportions de diamètres à partir du volume des bûches entières avec ceux obtenus après « décomposition » virtuelle des bûches 248

Figure 76 : Analyse factorielle discriminante permettant de mettre en évidence les différences entre les trois charbonnières et également entre les essences. . 251

Figure 77 : Graphiques représentant l'évolution des proportions de volume par classes de rayon..... 254

Figure 78 : Présentation de l'ensemble des rayons de courbure mesurés pour chaque charbonnière et pour chaque essence..... 256

Figure 79 : Proportions par classes de rayons établies en fonction du nombre, du volume et de la surface des charbons 258

Figure 80 : Explication de la barre d'erreur verticale : différence entre les proportions les plus élevées et les plus faibles obtenues sur les proportions prenant en compte l'erreur associée à la mesure de +/- 26 % 259

Figure 81 : Analyses Factorielles Discriminantes calculée en fonction du nombre, de la surface, et du volume, en prenant en considération les rayons de courbure moyens mesurés, l'ajout de l'erreur associée et le retrait de l'erreur associée. . 261

Figure 82 : Comparaison des proportions avant et après carbonisation, en fonction du nombre (a), de la surface (b) et du volume (c) pour le chêne pour la charbonnière au mélange de diamètres. (d) matrice de corrélation 264

Figure 83 : Comparaison des proportions avant et après carbonisation, en fonction du nombre (a), de la surface (b) et du volume (c) pour le chêne pour la charbonnière aux gros diamètres. (d) matrice de corrélation..... 266

Figure 84 : Comparaison des proportions avant et après carbonisation, en fonction du nombre (a), de la surface (b) et du volume (c) pour le hêtre pour la charbonnière au mélange de diamètre. (d) matrice de corrélation 266

Figure 85 : Comparaison des proportions avant et après carbonisation, en fonction du nombre (a), de la surface (b) et du volume (c) pour le châtaignier pour la charbonnière aux petits diamètres. (d) matrice de corrélation..... 267

Figure 86 : Classes de diamètres employées par O. Nelle et T. Ludemann pour calculer le

diamètre moyen (d'après Nelle, 2002, modifié). 273

Figure 87 : Histogrammes obtenus sur quatre charbonnières contemporaines pour lesquelles le diamètre des bois employé était bien connu (d'après Nelle, 2002, modifié) 274

Figure 88 : Représentation des diamètres moyens obtenus sur les bûches avant la carbonisation et sur les résultats de l'analyse dendro-anthracologique en utilisant une moyenne pondérée 276

Figure 89 : Représentation des diamètres moyens obtenus sur les bûches avant la carbonisation et sur les résultats de l'analyse dendro-anthracologique calculés à partir d'une moyenne arithmétique 278

Figure 90 : Comparaison des spectres issus de l'analyse dendro-anthracologique de la charbonnière aux petits diamètres aux quatre histogrammes de référence de O.Nelle et T. Ludemann 280

Figure 91 : Comparaison des spectres issus de l'analyse dendro-anthracologiques de la charbonnière aux gros diamètres aux quatre histogrammes de référence de O.Nelle et T. Ludemann. 282

Figure 92 : Comparaison des spectres issus de l'analyse dendro-anthracologique de la charbonnière au mélange de diamètres aux quatre histogrammes de référence de O.Nelle et T. Ludemann 283

Figure 93 : Explication du principe du modèle établi par A. Dufraisse (d'après Dufraisse, 2002). A : Décomposition des bûches en classes de cylindres creux. B : Construction de la table théorique. C : Extrait de la table théorique 286

Figure 94 : Fonctionnement du modèle établi par A. Dufraisse (Dufraisse, 2002, 2006 ; Dufraisse et Garcia-Martinez, 2011) 288

Figure 95 : Comparaison des proportions par classe de diamètres avant la carbonisation avec les résultats issus de l'analyse anthracologique et traités par le modèle établi par A. Dufraisse 290

Figure 96 : Comparaison des proportions connues par classe de diamètres avant la carbonisation avec les diamètres restitués après traitement par le modèle « Dufraisse » des proportions de volume par classe de rayons calculées à partir de la « décomposition » virtuelle des bûches 293

Figure 97 : Présentation des soixante et une simulations 297

Figure 98 : Représenter les proportions de diamètre par classe, en fonction du nombre de bûches ou en fonction du volume 298

Figure 99 : Exemple de calculs pour construire les spectres théoriques 299

Figure 100 : Explication de la présentation des 61 simulations pour développer la démarche inductive 300

Figure 101 : Classification Ascendante Hiérarchique obtenue pour l'ensemble des simulations et définition des six groupes..... 301

Figure 102 : Groupe 2 des histogrammes de référence 304

Figure 103 : Exemple de simulations difficilement différenciables (simulation 5, 15 et 16).. 305

Figure 104 : Explication de la procédure à suivre pour conduire la démarche comparative.. 307

Figure 105 : Présentation de l'Analyse Factorielle Discriminante comparant les données de l'expérimentation avant et après carbonisation aux soixante et une simulations 309

Figure 106 : Exemple de traitement des données connues avant la carbonisation à partir de la méthode inductive. A) Le hêtre de la charbonnière aux petits diamètres. B) Le châtaignier de la charbonnière au mélange de diamètres 311

Figure 107 : Exemple de traitement des données connues avant la carbonisation à partir de la méthode inductive. A) Le châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres. B) Le chêne de la charbonnière au mélange de diamètres..... 313

Figure 108 : Exemple de restitution des proportions de diamètres à partir des spectres dendro-anthracologiques. A) Le hêtre de la charbonnière aux petits diamètres. B) Le châtaignier de la charbonnière au mélange de diamètres. C) Le chêne de la charbonnière au mélange de diamètres..... 315

Figure 109 : Exemple ne permettant pas une bonne restitution du diamètre des bois, A)le cas du hêtre, B) le cas du chêne de la charbonnière aux gros diamètres..... 317

Figure 110 : Le cas particulier du châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres . 318

Figure 111 : Construction des spectres de référence pour un taillis de châtaignier âgé de 12 ans et comparaison de ces histogrammes avec les données obtenues sur le châtaignier de la charbonnière expérimentale au mélange de diamètres..... 321

Figure 112 : Carte de localisation du mont Lozère (Kleitz, 2008 modifié)..... 325

Figure 113 : A) Carte de localisation des sites d'ateliers indiquant leur contexte taphonomique. B) Photographie du site à scories 48 (cliché M.C. Bailly Maître). C) Photographie d'une scorie noire (cliché A. Ploquin)..... 328

Figure 114 : Datation des ateliers de réduction..... 329

Figure 115 : Photographie des fouilles réalisées. A) Site 3 (Cliché A. Ploquin). B) Site 8 (Cliché A. Ploquin)..... 330

Figure 116 : A) Photographie de haldes de mines (Cliché A. Ploquin) B) Carte de localisation des mines connues autour du secteur de réduction du minerai .. 331

Figure 117 : Proposition d'estimation d'un rapport entre volume de minerai et volume de charbon nécessaire pour procéder à la réduction du minerai de plomb argentifère (d'après Allée ***et al.***, 2011)..... 333

Figure 118 : A) Carte de prospection des plateformes de charbonnage sur la partie ouest du mont Lozère. B et C) Photographies de plateformes de charbonnage (Cliché Paradis-Grenouillet) 336

Figure 119 : Ensemble des datations réalisées sur les ateliers de réduction (en rouge) et sur les plateformes de charbonnage (en vert) classées de la date la plus ancienne vers la plus récente..... 338

Figure 120 : Exemple de trois datations réalisées sur les charbonnières Countrasts 1 et 2... 341

Figure 121 : Carte de localisation de l'ensemble des sites à scories et des plateformes de charbonnage 342

Figure 122 : Modèles d'organisation du territoire métallurgique sur les versants du mont Lozère (Allée et Paradis, 2007 modifié) 343

Figure 123 : A) Tableau de distance entre les plateformes de charbonnage et les ateliers de réduction. B) Exemple d'organisation des ateliers et des plateformes de charbonnage sur le secteur de Countrasts 344

Figure 124 : Tableau récapitulant les distances entre les plateformes de charbonnage . 345

Figure 125 : A) Proposition de restitution des anciens espaces forestiers charbonnés sur le mont Lozère (Allée ***et al.***, 2011 modifié), B) Photographie de la rupture de pente entre les versants et le sommet du mont Lozère (cliché S. Paradis-Grenouillet)..... 347

Figure 126 : Carte de localisation des plateformes de charbonnage et des sites à scories pour lesquels une analyse dendro-anthracologique a été réalisée..... 352

Figure 127 : Résultats de l'Analyse Factorielle Discriminante, comparant les données archéologiques aux simulations et au résultat obtenu sur le taillis de châtaignier..... 356

Figure 128 : Exemple de résultats présentant une dominance de bois compris entre 5 et 10 cm de diamètre. A) Le cas de la charbonnière Countrasts 1. B) Le cas du niveau de surface de Samouse 9 358

Figure 129 : Exemple d'utilisation de « petits bois ». A) Le cas de la charbonnière Vareilles 11. B) Le cas du niveau de surface de la charbonnière Vareilles 47 360

Figure 130 : Exemples d'utilisation de « gros bois ». A) Le cas du niveau de profondeur de Samouse 9. B) Le cas du niveau de surface de Bourrassade 22..... 361

Figure 131 : Exemple de niveaux présentant des profils d'histogrammes similaires au taillis de châtaignier. A) Le cas du niveau de surface de la charbonnière Corrizo 6. B) Le cas du niveau de profondeur de la charbonnière Bourrassade 5..... 363

Figure 132 : Résultats obtenus pour la charbonnière Corrizo 6..... 366

Figure 133 : Exemple de réduction du diamètre des bois obtenus sur la charbonnière Vareilles 47 367

Figure 134 : Résultats obtenus pour la charbonnière Bourrassade 2..... 369

Annexes

Annexes du Chapitre 3

Les annexes du chapitre 3 sont constituées des graphiques représentant l'évolution des fréquences par essence en fonction du nombre de charbons étudiés. Réalisés en fonction du nombre, de la surface ou encore du volume de charbon ils permettent d'étudier si les spectres anthracologiques sont représentatifs de l'échantillon prélevé.

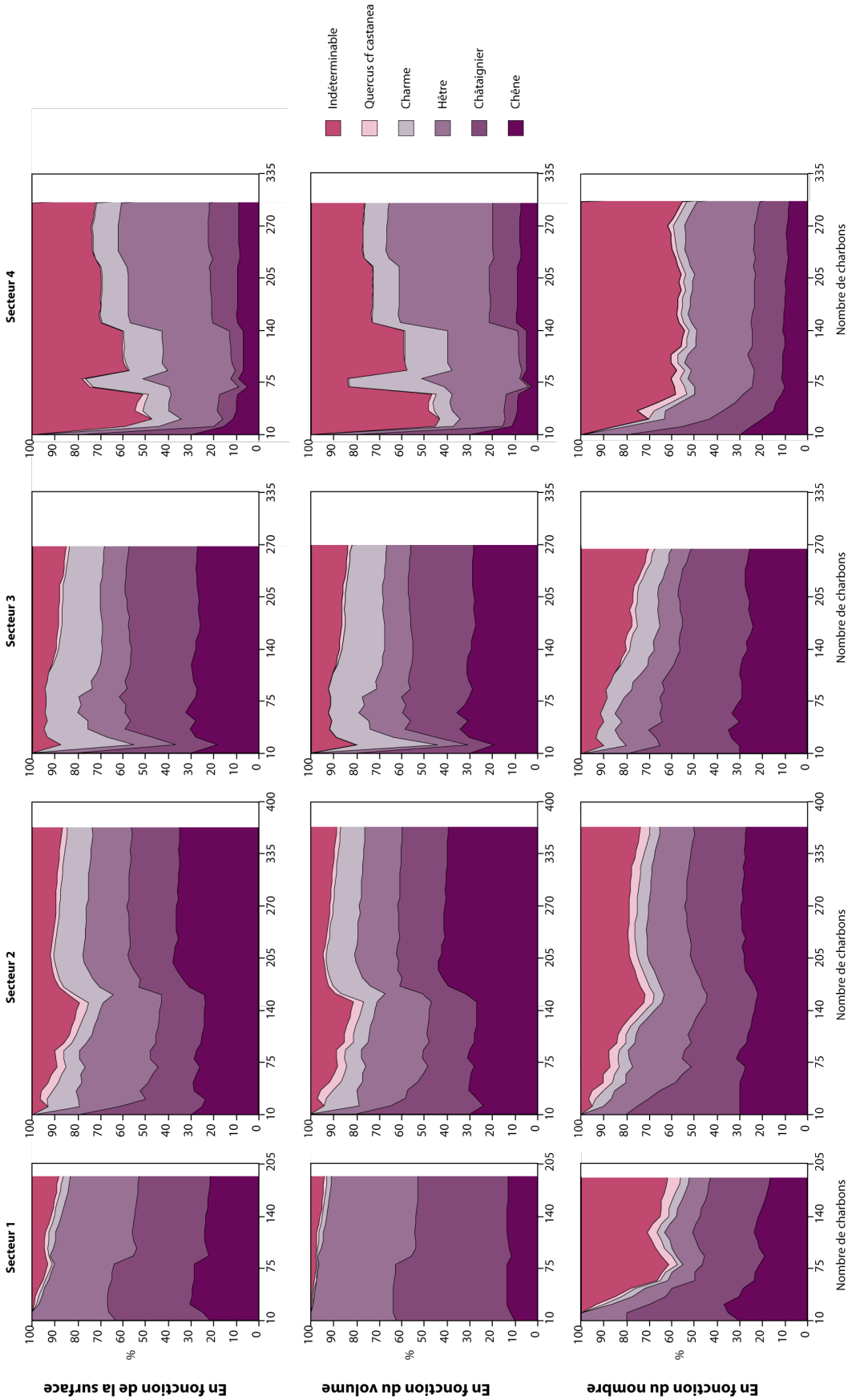
Ces graphiques ont été construits pour chacun des secteurs de prélèvement de chaque charbonnière expérimentale de Pouligny, ils sont alors présentés selon trois annexes

Annexe 1 : Evolution des fréquences des différentes essences en fonction du nombre de charbon pour la charbonnière aux petits diamètres

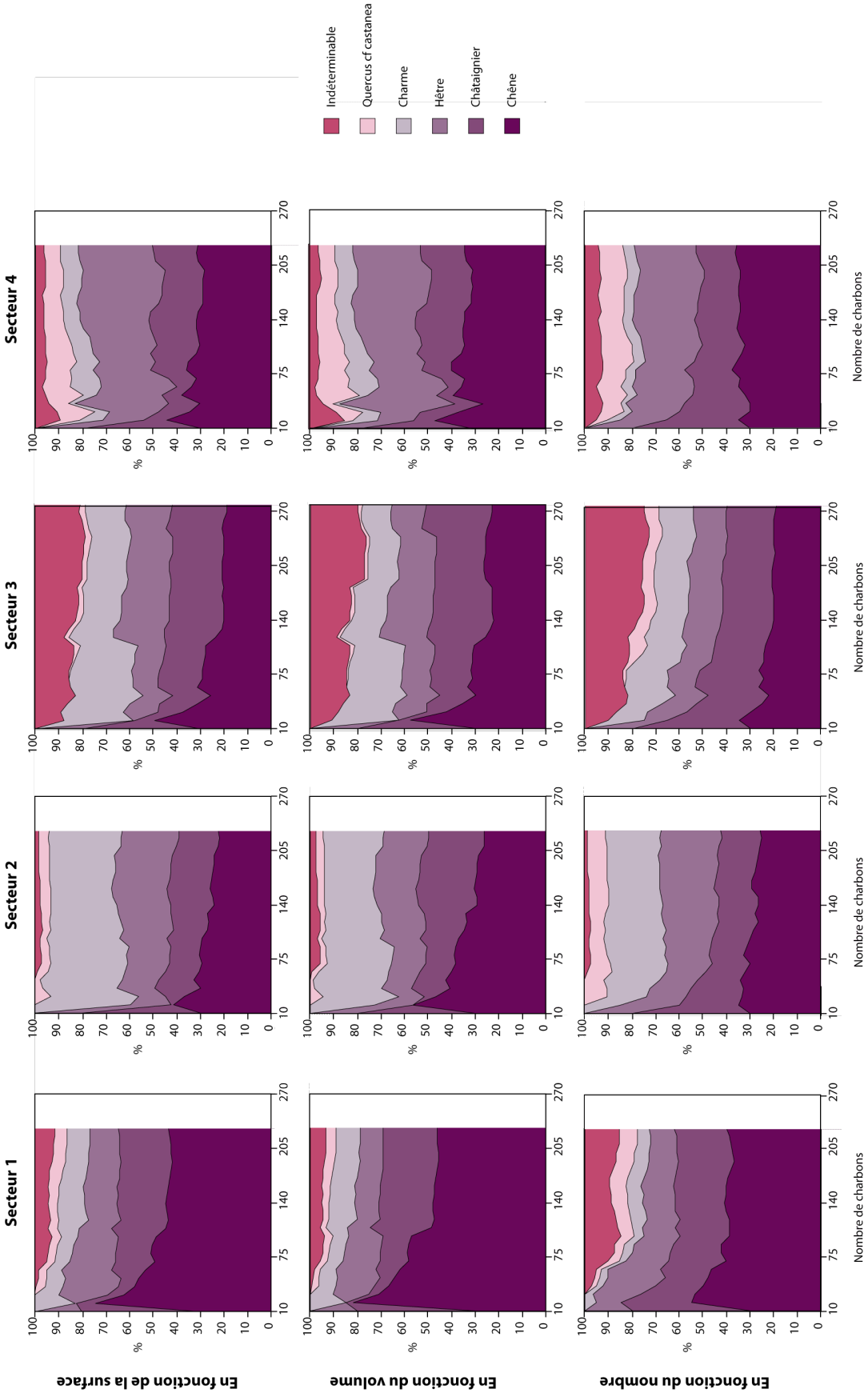
Annexe 2 : Evolution des fréquences des différentes essences en fonction du nombre de charbon pour la charbonnière aux gros diamètres

Annexe 3 : Evolution des fréquences des différentes essences en fonction du nombre de charbon pour la charbonnière au mélange de diamètres

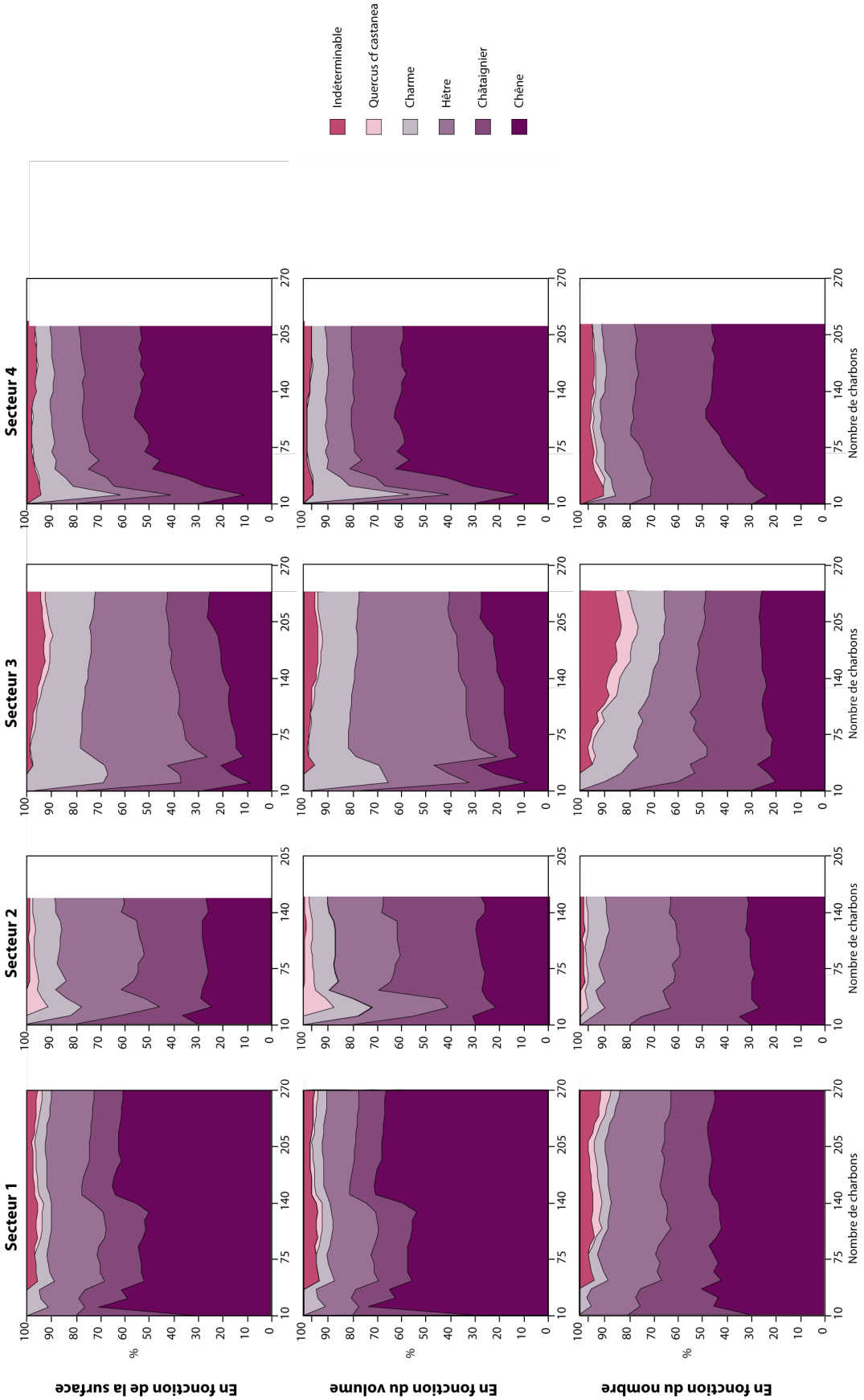
Annexe 1 : Evolution des fréquences des différentes essences en fonction du nombre de charbon pour la charbonnière aux petits diamètres



Annexe 2 : Evolution des fréquences des différentes essences en fonction du nombre de charbon pour la charbonnière aux gros diamètres



Annexe 3 : Evolution des fréquences des différentes essences en fonction du nombre de charbon pour la charbonnière au mélange de diamètres



Annexes du chapitre 4

Pour alléger la lecture du chapitre nous avons choisi de mettre certains résultats bruts en annexes. Ce chapitre compte quatre annexes, la première porte sur la comparaison des données connues avant la carbonisation, il s'agissait de vérifier que chaque charbonnière était bien différenciable des autres et de même pour les quatre essences.

Les trois suivantes représentent les résultats bruts obtenus à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique que l'on peut comparer aux proportions par classes de rayons connues avant la carbonisation.

Annexe 4 : Matrice de corrélation pour identifier les similitudes entre les charbonnières et entre les essences

Annexe 5 : Comparaison des données dendro-anthracologiques aux données connues avant la carbonisation pour la charbonnière aux petits diamètres

Annexe 6 : Comparaison des données dendro-anthracologiques aux données connues avant la carbonisation pour la charbonnière aux gros diamètres

Annexe 7 : Comparaison des données dendro-anthracologiques aux données connues avant la carbonisation pour la charbonnière au mélange diamètres

Annexe 4 : Matrice de corrélation pour identifier les similitudes entre les charbonnières et entre les essences

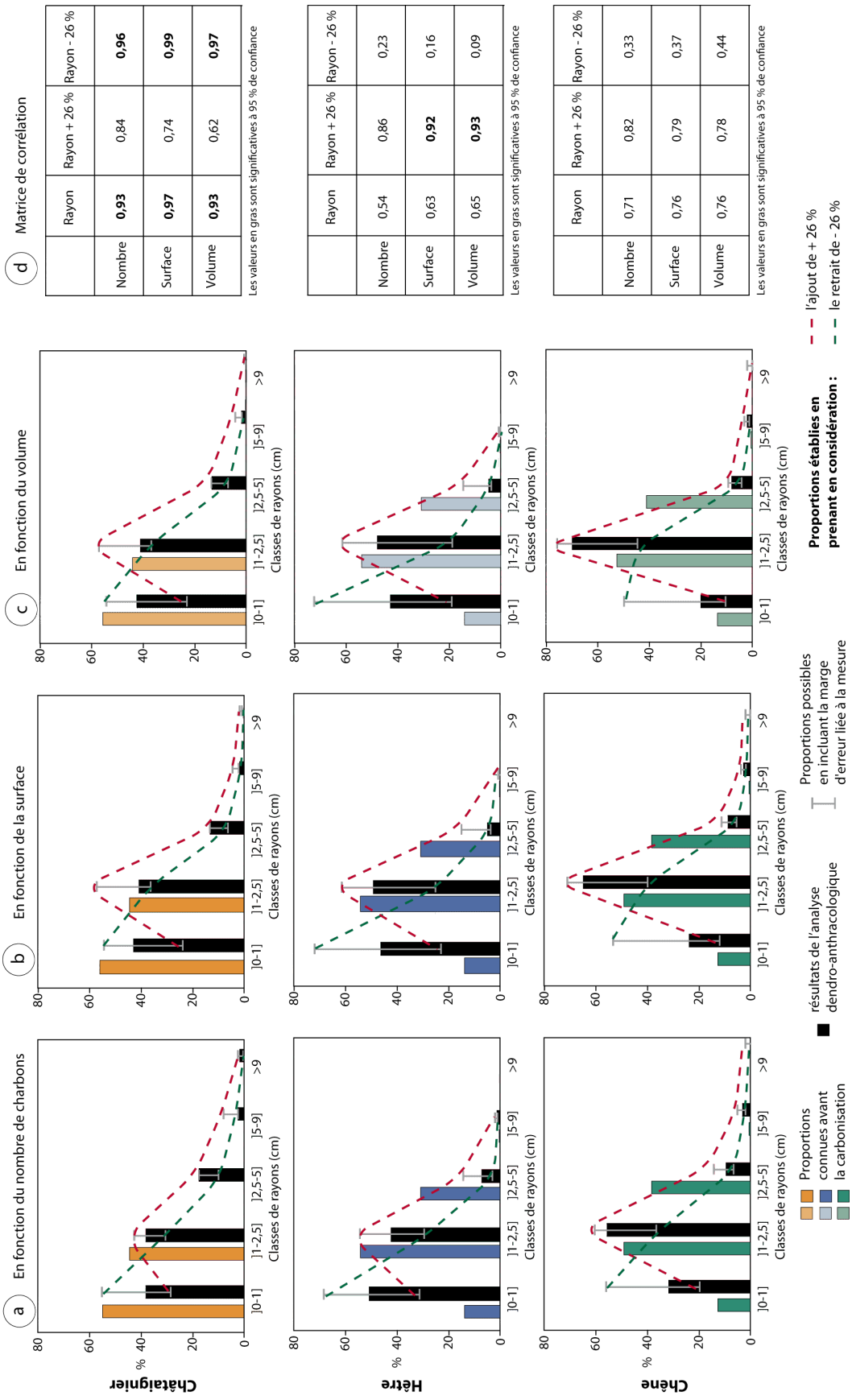
r	p	Mélange	Mélange	Mélange	Mélange	Gros	Gros	Gros	Gros	Petits	Petits	Petits	Petits
		Chêne	Hêtre	Châtaignier	Tout	Chêne	Hêtre	Châtaignier	Tout	Chêne	Hêtre	Châtaignier	Tout
Mélange	Chêne	**1,00**	**< 0,0001**	0,15	**0,01**	0,45	0,11	**0,03**	0,20	0,17	0,27	0,75	0,20
Mélange	Hêtre	**1,00**	**1,00**	0,15	**0,01**	0,45	0,11	**0,03**	0,20	0,17	0,27	0,75	0,20
Mélange	Châtaignier	0,74	0,74	**1,00**	**0,04**	0,19	0,76	0,27	0,86	**0,00**	**0,00**	0,57	0,86
Mélange	Tout	**0,96**	**0,96**	**0,90**	**1,00**	-0,58	0,60	0,85	0,40	**0,88**	0,81	0,01	0,40
Gros	Chêne	-0,45	-0,45	-0,70	0,30	**1,00**	-0,04	0,61	0,64	0,20	0,18	0,13	0,64
Gros	Hêtre	0,79	0,79	0,19	0,29	0,95	**1,00**	0,15	**0,05**	0,81	0,96	0,31	**0,05**
Gros	Châtaignier	**0,92**	**0,92**	0,61	0,07	-0,31	0,74	**1,00**	0,12	0,28	0,45	0,57	0,12
Gros	Tout	0,69	0,69	0,11	0,49	0,29	**0,88**	0,78	**1,00**	0,09	-0,07	-0,84	**1,00**
Petits	Chêne	0,72	0,72	**1,00**	**0,05**	-0,69	0,15	0,61	0,88	**1,00**	**0,98**	0,35	0,88
Petits	Hêtre	0,61	0,61	**0,98**	0,10	-0,70	0,03	0,45	0,91	**0,00**	**1,00**	0,43	0,91
Petits	Châtaignier	-0,20	-0,20	0,34	0,98	-0,76	-0,57	-0,34	0,08	0,57	0,46	**1,00**	0,08
Petits	Tout	0,69	0,69	0,11	0,49	0,29	**0,88**	0,78	**1,00**	0,09	-0,07	-0,84	**1,00**

r = coefficient de corrélation de Pearson

p = probabilité d'erreur en indiquant que les données sont similaires

Les données en gras sont siginifcatives à 95 % de confiance

Annexe 5 : Comparaison des données dendro-anthracologiques aux données connues avant la carbonisation pour la charbonnière aux petits diamètres



d Matrice de corrélation

	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	**0,93**	0,84	**0,96**
Surface	**0,97**	0,74	**0,99**
Volume	**0,93**	0,62	**0,97**

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

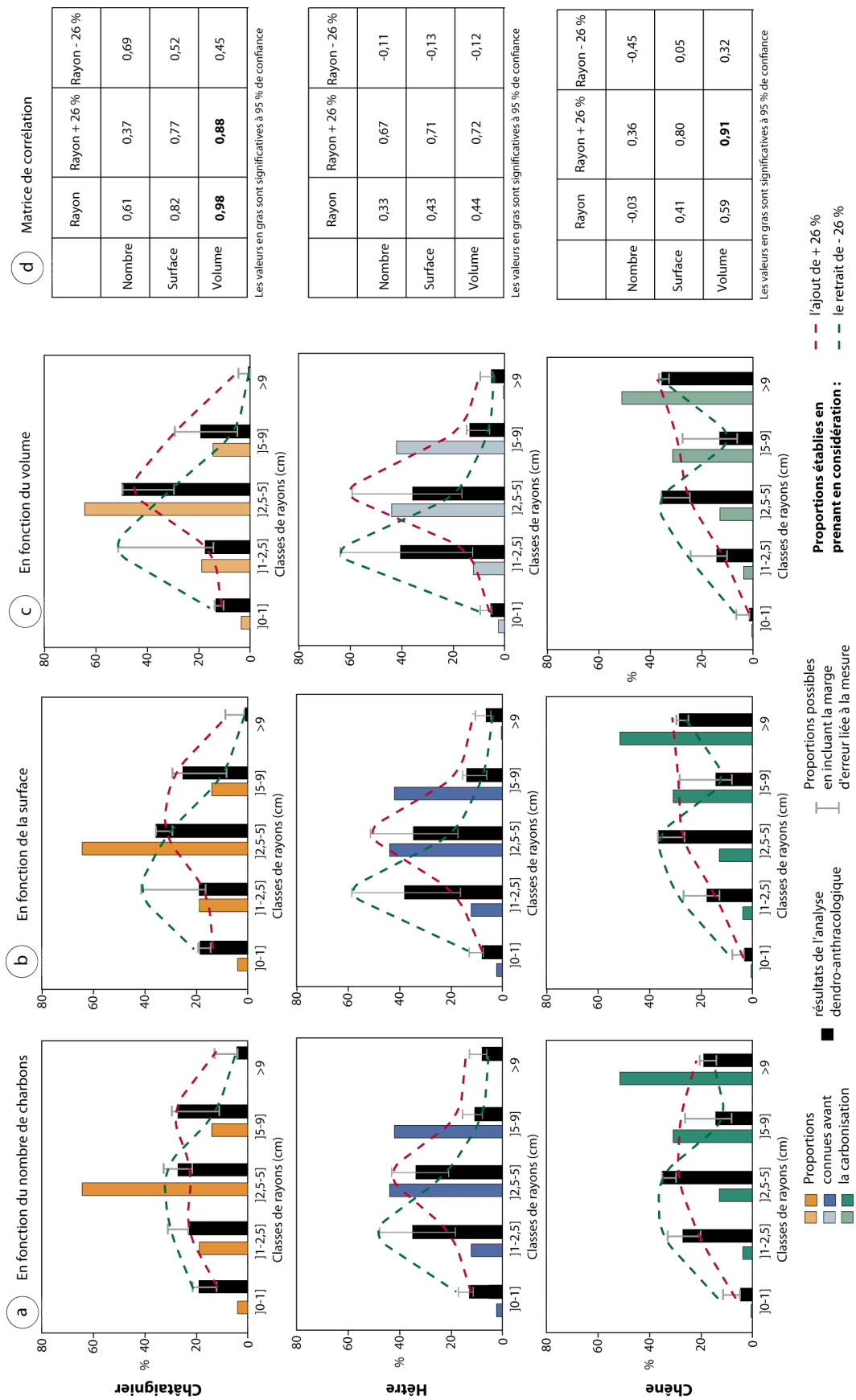
	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	0,54	0,86	0,23
Surface	0,63	**0,92**	0,16
Volume	0,65	**0,93**	0,09

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	0,71	0,82	0,33
Surface	0,76	0,79	0,37
Volume	0,76	0,78	0,44

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

Annexe 6 : Comparaison des données dendro-anthracologiques aux données connues avant la carbonisation pour la charbonnière aux gros diamètres



d Matrice de corrélation

	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	0,61	0,37	0,69
Surface	0,82	0,77	0,52
Volume	**0,98**	**0,88**	0,45

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

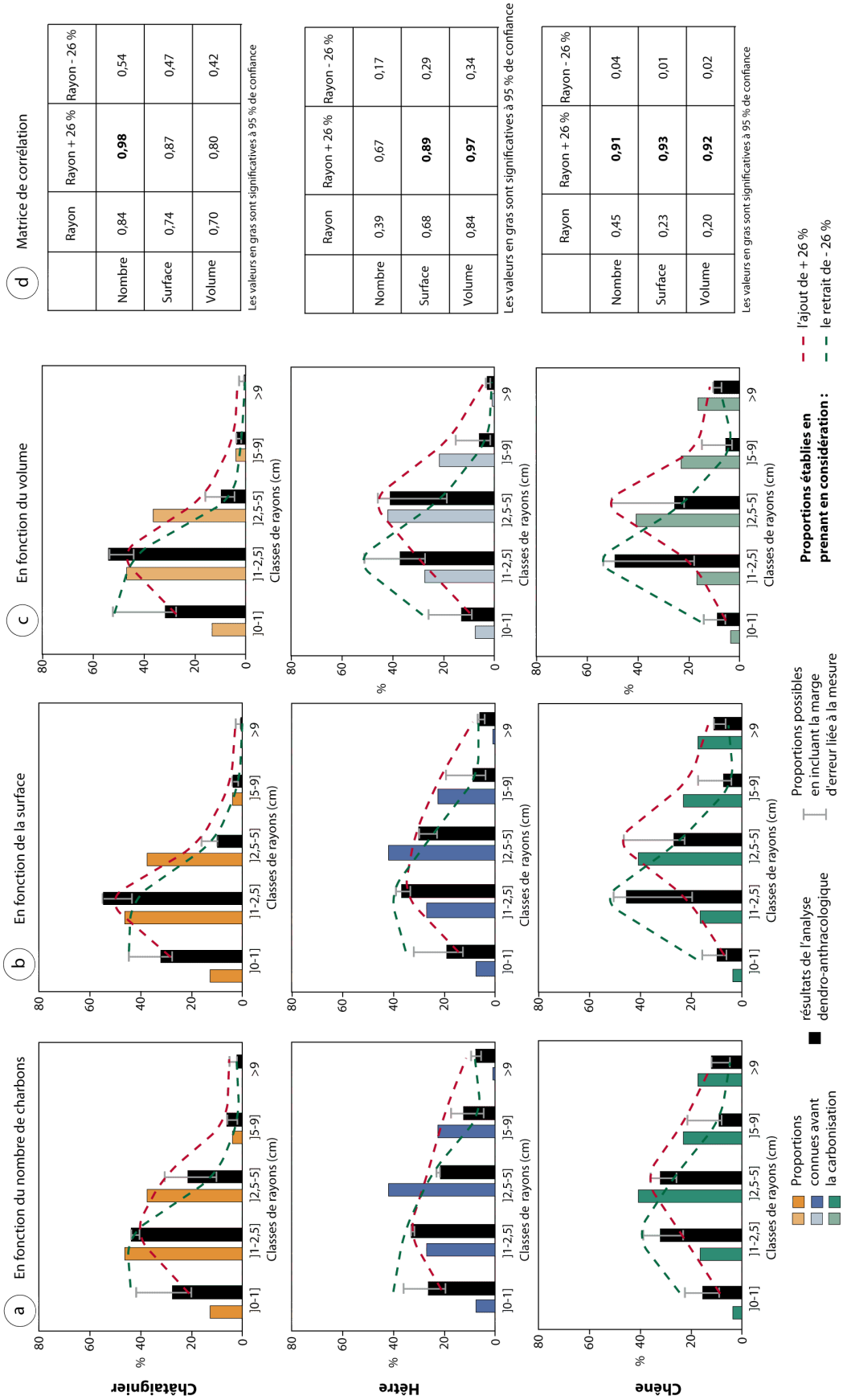
	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	0,33	0,67	-0,11
Surface	0,43	0,71	-0,13
Volume	0,44	0,72	-0,12

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	-0,03	0,36	-0,45
Surface	0,41	0,80	0,05
Volume	0,59	**0,91**	0,32

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

Annexe 7 : Comparaison des données dendro-anthracologiques aux données connues avant la carbonisation pour la charbonnière au mélange de diamètres



d Matrice de corrélation

	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	0,84	**0,98**	0,54
Surface	0,74	0,87	0,47
Volume	0,70	0,80	0,42

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	0,39	0,67	0,17
Surface	0,68	**0,89**	0,29
Volume	0,84	**0,97**	0,34

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

	Rayon	Rayon + 26 %	Rayon - 26 %
Nombre	0,45	**0,91**	0,04
Surface	0,23	**0,93**	0,01
Volume	0,20	**0,92**	0,02

Les valeurs en gras sont significatives à 95 % de confiance

Annexes du chapitre 5

Ces annexes s'organisent en deux parties.
La première constitue un catalogue des différentes simulations, classées par groupes puis hiérarchisées par sous groupes. Ces données permettent d'appliquer la démarche comparative à d'autres corpus que ceux présentés dans le cadre de cette thèse.

On retrouve alors :

Annexe 8 : Liste des simulations indiquant d'une part la composition des assemblages de diamètres et d'autre part les proportions obtenues par classes de rayons à l'issue de la décomposition virtuelle.

Annexe 9 : Présentation de la Classification Ascendante Hiérarchique permettant d'associer statistiquement les simulations similaires.

Annexe 10 : Présentation des simulations du groupe 1

Annexe 11 : Présentation des simulations du groupe 2

Annexe 12 : Présentation des simulations du groupe 3

Annexe 13 : Présentation des simulations du groupe 4

La seconde partie contient l'ensemble des résultats obtenus sur les charbonnières expérimentales, permettant ainsi de comparer les résultats obtenus à partir des données connues avant la carbonisation issue de la décomposition virtuelle, et les résultats obtenus à l'issue de l'analyse dendro-anthracologique.

Annexe 14 : Résultats de l'approche comparative sur le hêtre de la charbonnière aux petits diamètres

Annexe 15 : Résultats de l'approche comparative sur le chêne de la charbonnière aux petits diamètres

Annexe 16 : Résultats de l'approche comparative sur le châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres

Annexe 17 : Résultats de l'approche comparative sur le hêtre de la charbonnière aux gros diamètres

Annexe 18 : Résultats de l'approche comparative sur le chêne de la charbonnière aux gros diamètres

Annexe 19 : Résultats de l'approche comparative sur le châtaignier de la charbonnière aux gros diamètres

Annexe 20 : Résultats de l'approche comparative sur le hêtre de la charbonnière au mélange de diamètres

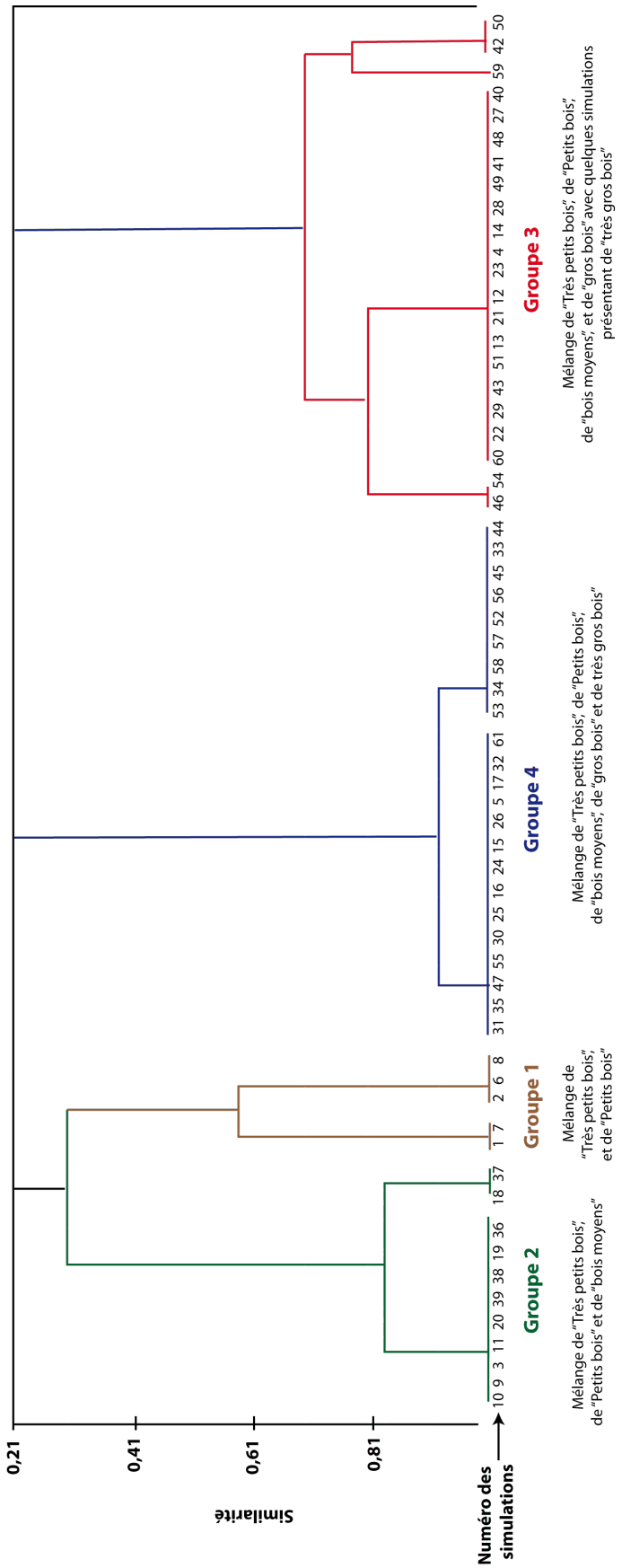
Annexe 21 : Résultats de l'approche comparative sur le chêne de la charbonnière au mélange de diamètres

Annexe 22 : Résultats de l'approche comparative sur le châtaignier de la charbonnière au mélange de diamètres

Annexe 8 : Liste des simulations indiquant d'une part la composition des assemblages de diamètres et d'autre part les proportions obtenues par classes de rayons à l'issue de la décomposition virtuelle.

Numéro simulation	Description de l'assemblage	Proportions par classes de diamètre (cm)					Proportions par classe de rayons (cm)				
		]0-2]	]2-5]	]5-10]	]10-18]	>18	]0-1]	]1-2,5]	]2,5-5]	]5-9]	> 9
1	Très petits bois seulement (0-2 cm diamètre)	100					100	0	0	0	0
2	Petits bois seulement (2-5 cm diamètre)		100				44	56	0	0	0
3	Bois moyens seulement (5-10 cm diamètre)			100			8	42	50	0	0
4	Gros bois seulement (10-18 cm diamètre)				100		2	10	37	51	0
5	Très gros bois seulement (supérieurs à 18 cm)					100	1	3	12	35	50
6	Très petits bois et petits bois à parts égales	50	50				28	72	0	0	0
7	Très petits bois et petits bois, très petits bois majoritaires	70	30				73	27	0	0	0
8	Très petits bois et petits bois, petits bois majoritaires	30	70				53	47	0	0	0
9	Très petits bois et bois moyens à parts égales	50		50			15	39	46	0	0
10	Très petits bois et bois moyens, très petits bois majoritaires	70		30			22	35	42	0	0
11	Très petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires	30		70			11	41	48	0	0
12	Très petits bois et gros bois à parts égales	50			50		4	10	36	50	0
13	Très petits bois et gros bois, très petits bois majoritaires	70			30		6	10	35	48	0
14	Très petits bois et gros bois, gros bois majoritaires	30			70		3	10	37	50	0
15	Très petits bois et très gros bois à parts égales	50				50	1	3	12	35	49
16	Très petits bois et très gros bois, très petits bois majoritaires	70				30	2	3	12	34	49
17	Très petits bois et très gros bois, très gros bois majoritaires	30				70	1	3	12	35	49
18	Petits bois et bois moyens à parts égales		50	50			14	44	42	0	0
19	Petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires		70	30			19	46	35	0	0
20	Petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires		30	70			11	43	46	0	0
21	Petits bois et gros bois à parts égales		50		50		4	12	36	48	0
22	Petits bois et gros bois, petits bois majoritaires		70		30		6	15	34	46	0
23	Petits bois et gros bois, gros bois majoritaires		30		70		3	11	36	50	0
24	Petits bois et très gros bois à parts égales		50			50	1	4	12	34	49
25	Petits bois et très gros bois, petits bois majoritaires		70			30	2	5	11	34	48
26	Petits bois et très gros bois , très gros bois majoritaires		30			70	1	4	12	35	49
27	Bois moyens et gros bois à parts égales			50	50		3	17	40	41	0
28	Bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires			70	30		4	22	42	32	0
29	Bois moyens et gros bois, gros bois majoritaires			30	70		3	13	38	46	0
30	Bois moyens et très gros bois à parts égales			50		50	1	6	14	32	46
31	Bois moyens et très gros bois, bois moyens majoritiaires			70		30	2	9	18	30	42
32	Bois moyens et très gros bois, très gros bois majoritaires			30		70	1	5	13	34	48
33	Gros bois et très gros bois à parts égales				50	50	1	5	18	39	38
34	Gros bois et très gros bois, gros bois majoritiaires				70	30	1	6	22	42	29
35	Gros bois et très gros bois, très gros bois majoritiaires				30	70	1	4	15	37	44
36	Très petits bois, petits bois et bois moyens à parts égales	33,3	33,3	33,3			19	41	40	0	0
37	Très petits bois, petits bois et bois moyens, très petits bois majoritaires	70	15	15			34	33	32	0	0
38	Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires	15	70	15			28	46	26	0	0
39	Très petits bois, petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires	15	15	70			11	42	47	0	0
40	Très petits bois, bois moyens et gros bois à parts égales	33,3		33,3	33,3		5	16	39	40	0
41	Très petits bois, bois moyens et gros bois, très petits bois majoritaires	70		15	15		10	16	37	38	0
42	Très petits bois, bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires	15		70	15		6	27	44	23	0
43	Très petits bois, bois moyens et gros bois, gros bois majoritaires	15		15	70		3	12	38	48	0
44	Très petits bois, gros bois et très gros bois à parts égales	33,3			33,3	33,3	1	5	18	38	38
45	Très petits bois, gros bois et très gros bois, très petits bois majorititaires	70			15	15	3	5	17	38	37
46	Très petits bois, gros bois et très gros bois, gros bois majoritaires	15			70	15	2	7	27	44	20
47	Très petits bois, gros bois et très gros bois, très gros bois majoritaires	15			15	70	1	4	13	36	46
48	Petits bois, bois moyens et gros bois à parts égales		33,3	33,3	33,3		5	18	38	39	0
49	Petits bois, bois moyens et gros bois, petits bois majoritaires		70	15	15		9	22	34	35	0
50	Petits bois, bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires		15	70	15		6	28	43	23	0
51	Petits bois, bois moyens et gros bois, gros bois majoritaires		15	15	70		3	12	37	48	0
52	Bois moyens, gros bois et très gros bois à parts égales			33,3	33,3	33,3	1	7	20	36	36
53	Bois moyens, gros bois et très gros bois, bois moyens majoritaires			70	15	15	2	13	25	30	29
54	Bois moyens, gros bois et très gros bois, gros bois majoritaires			15	70	15	2	9	28	43	19
55	Bois moyens, gros bois et très gros bois, très gros bois majoritaires			15	15	70	1	4	14	35	46
56	Tous à parts égales	20	20	20	20	20	2	8	19	36	35
57	Tous, très petits bois majoritaires	70	7,5	7,5	7,5	7,5	7	8	20	34	30
58	Tous, petits bois majoirtaires	7,5	70	7,5	7,5	7,5	7	13	19	32	28
59	Tous, bois moyens majoritaires	7,5	7,5	70	7,5	7,5	5	21	32	23	19
60	Tous, gros bois majoritaires	7,5	7,5	7,5	70	7,5	2	10	32	46	9
61	Tous, très gros bois majoritaires	7,5	7,5	7,5	7,5	70	1	4	13	34	47

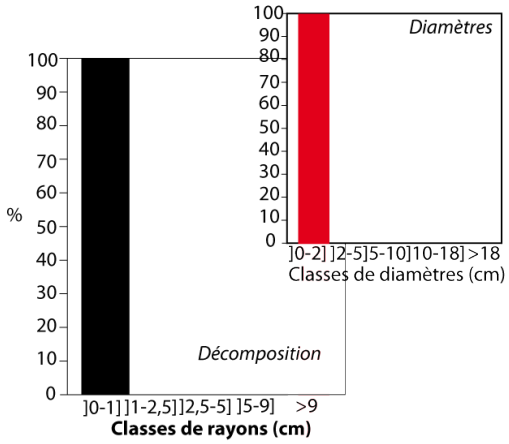
Annexe 9 : Présentation de la Classification Ascendante Hiérarchique permettant d'associer statistiquement les simulations similaires



Annexe 10 : Présentation des simulations du groupe 1, une à deux classes de rayons représentées

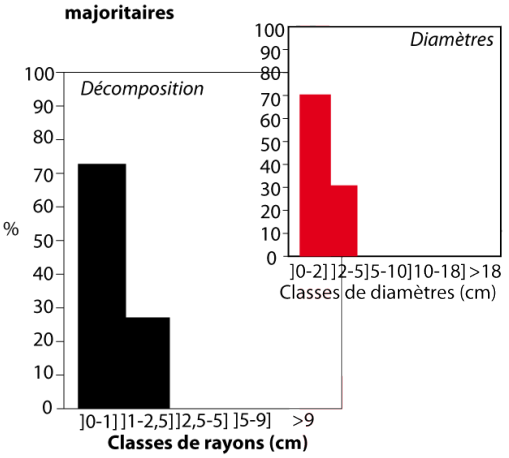
Groupe 1 a : 100 % dans la classe]0-1 cm]

1- Très petit bois uniquement

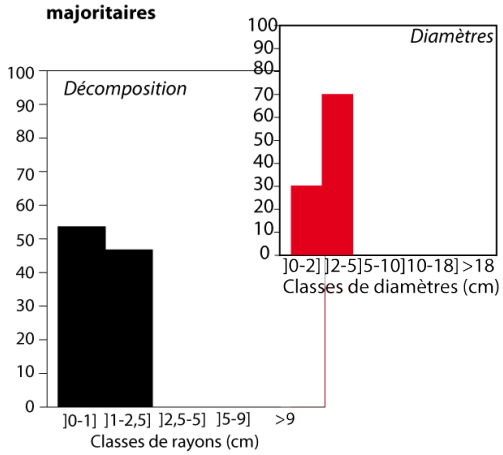


Groupe 1 b : Profils décroissants

7 - Très petits bois et petits bois, très petits bois majoritaires

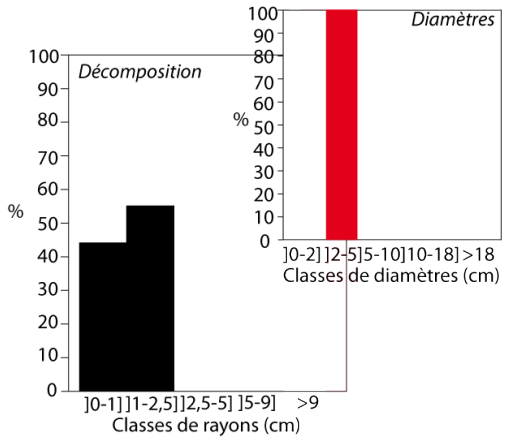


8 - Très petits bois et petits bois, petits bois majoritaires

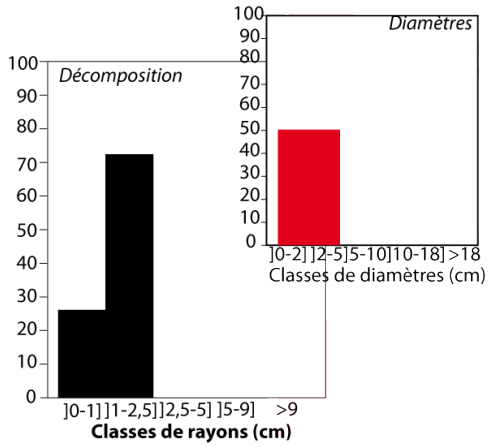


Groupe 1 c : Profils croissants

2 - Petits bois seulement



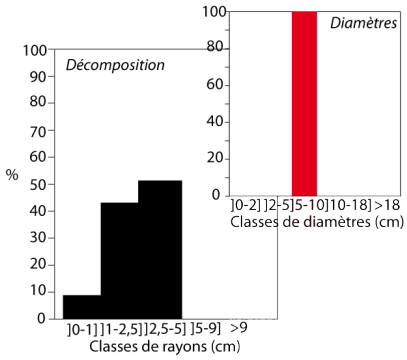
6 - Très petits bois et petits bois à parts égales



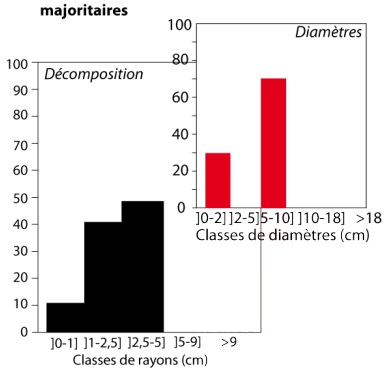
Annexe 11 : Présentation des simulations du groupe 2, trois classes de rayons représentées

Groupe 2 a : Profils croissants avec un écart important entre les classes]0-1 cm] et]1-2,5 cm]

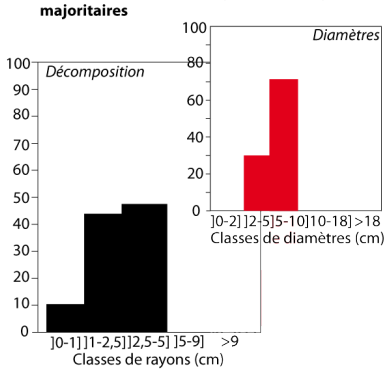
3 - Bois moyens seulement



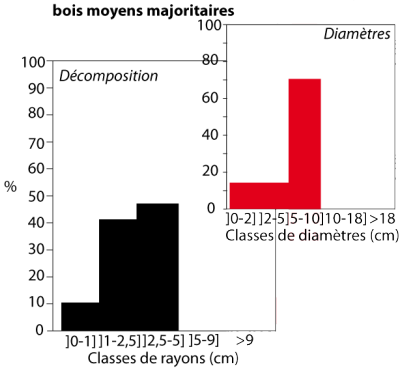
11 - Très petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires



20 - Petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires

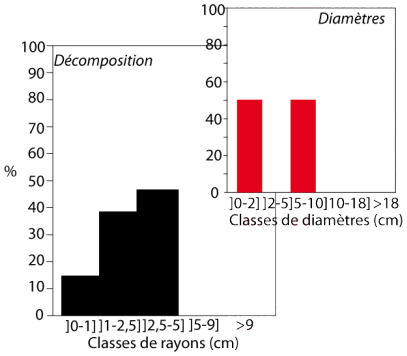


39 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, bois moyens majoritaires

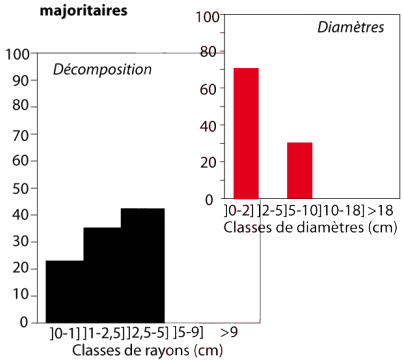


Groupe 2 b : Profils croissants avec un écart plus réduit entre les classes]0-1 cm] et]1-2,5 cm]

9 - Très petits bois et bois moyens à parts égales

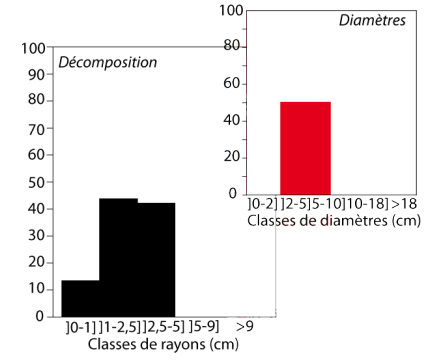


10 - Très petits bois et bois moyens, très petits bois majoritaires

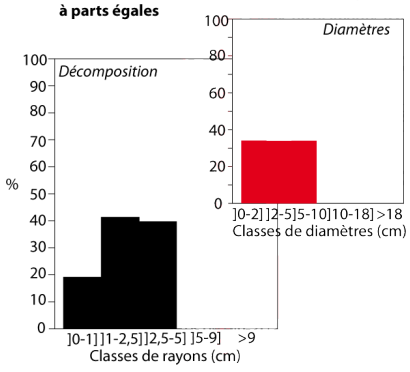


Groupe 2 c : Profils croissants avec très peu de différences entre les classes]1-2,5 cm] et]2,5-5 cm]

18 - Petits bois et bois moyens à part égales



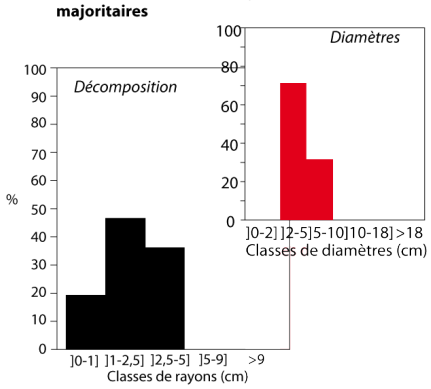
36 -Très petits bois, petits bois et bois moyens à parts égales



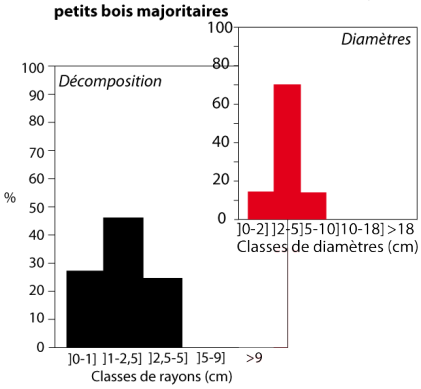
(suite)

Groupe 2 d : Profils en cloche

19 - Petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires

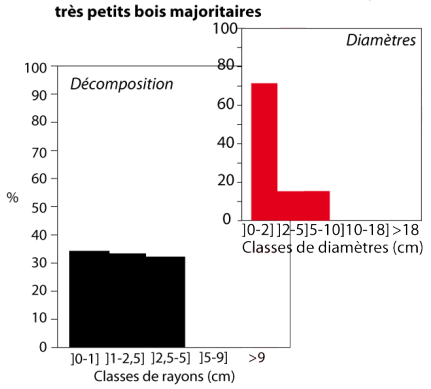


38 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires



Groupe 2 e : Proportions quasiment équivalentes entre les trois classes

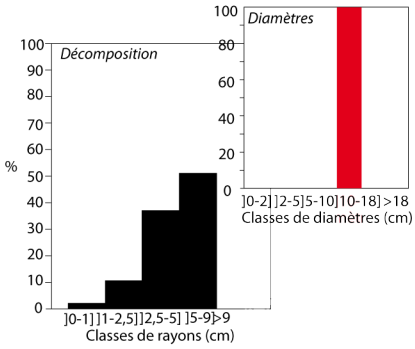
37 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, très petits bois majoritaires



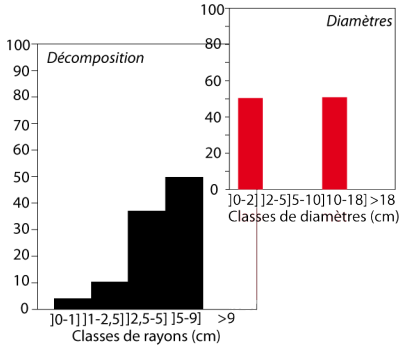
Annexe 12 : Présentation des simulations du groupe 3, quatre ou cinq classes de rayons représentées

Groupe 3 a : Quatre classes renseignées aux profils croissants bien marqués

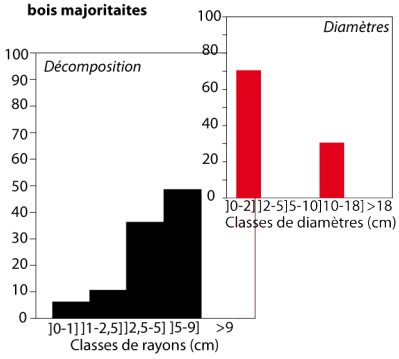
4 - Gros bois seulement



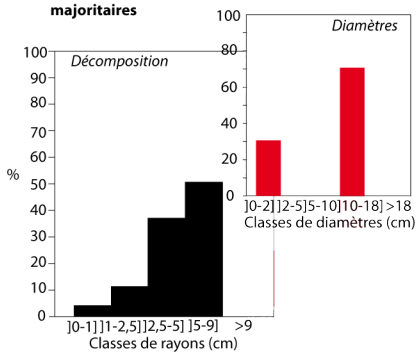
12 - Très petits bois et gros bois à parts égales



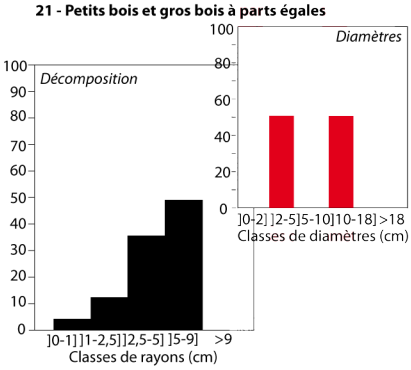
13 - Très petits bois et gros bois, très petits bois majoritaires



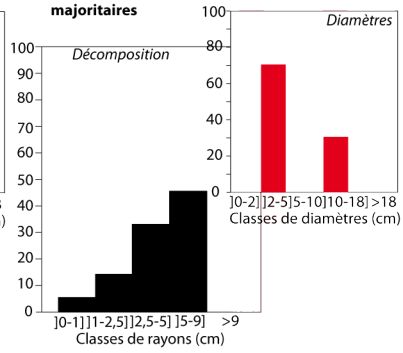
14 - Très petits bois et gros bois, gros bois majoritaires



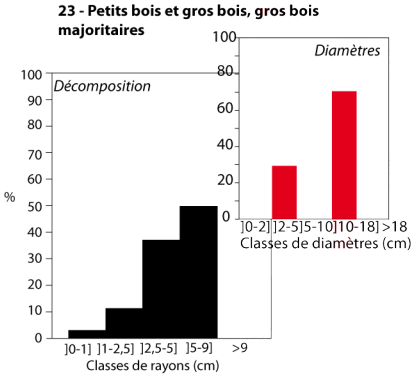
21 - Petits bois et gros bois à parts égales



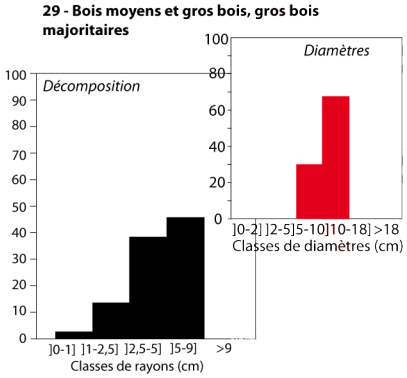
22 - Petits bois et gros bois , petits bois majoritaires



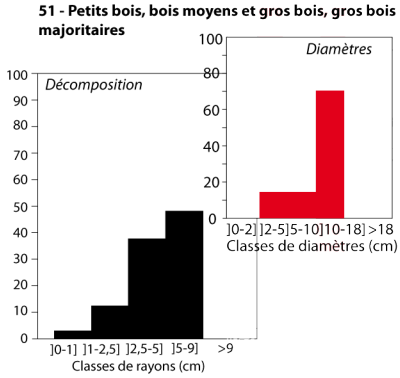
23 - Petits bois et gros bois, gros bois majoritaires



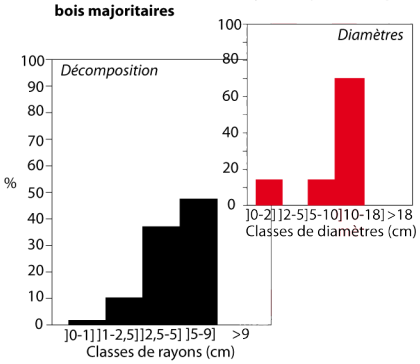
29 - Bois moyens et gros bois, gros bois majoritaires



51 - Petits bois, bois moyens et gros bois, gros bois majoritaires



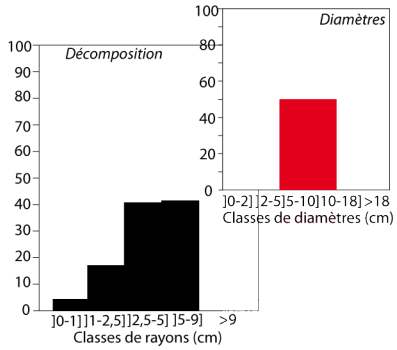
43 - Très petits bois, bois moyens et gros bois, gros bois majoritaires



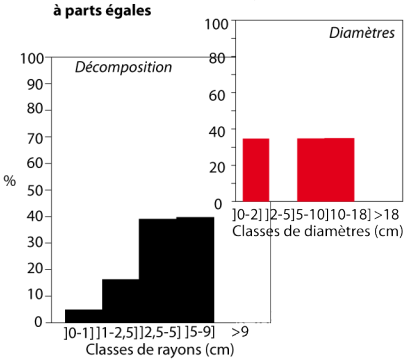
(suite)

Groupe 3 b : Profils croissants avec des proportions similaires dans les classes]2,5-5 cm] et]5-9 cm]

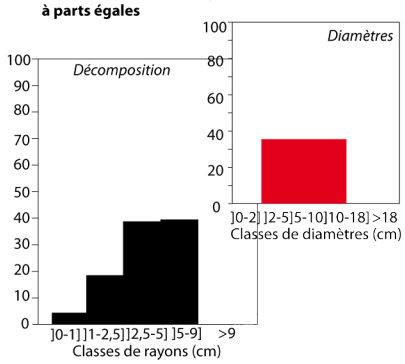
27 - Bois moyens et gros bois à parts égales



40 - Très petits bois, bois moyens et gros bois à parts égales

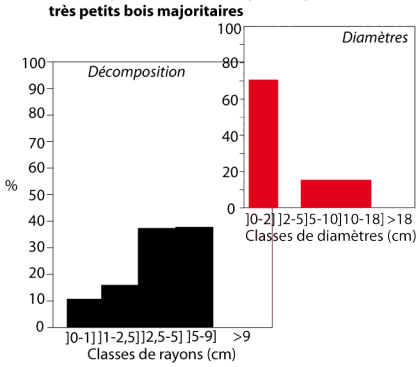


48 - Petits bois, bois moyens et gros bois à parts égales

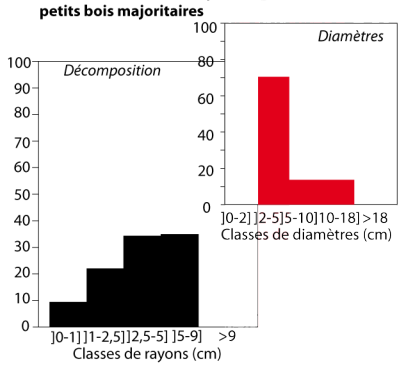


Groupe 3 c : Profils croissants avec des proportions similaires dans les classes]2,5-5 cm] et]5-9 cm] et de plus fortes proportions dans la classe]0-1 cm]

41 - Très petits bois, bois moyens et gros bois, très petits bois majoritaires

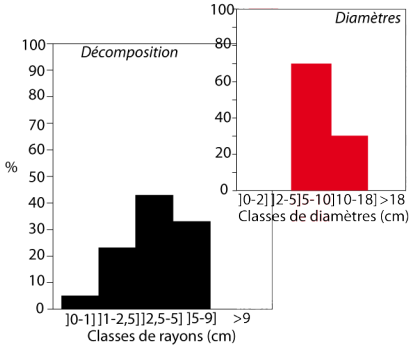


49 - Petits bois, bois moyens et gros bois, petits bois majoritaires

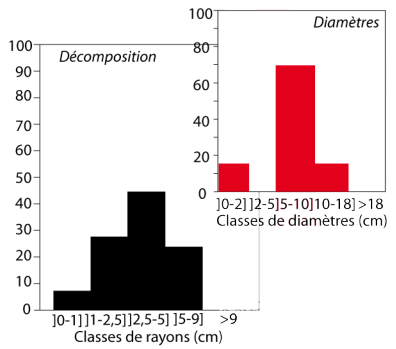


Groupe 3 d : Profils en cloche avec la classe]2,5-5 cm] majoritaire

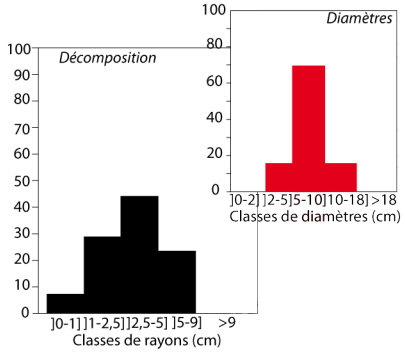
28 - Bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires



42 - Très petits bois, bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires



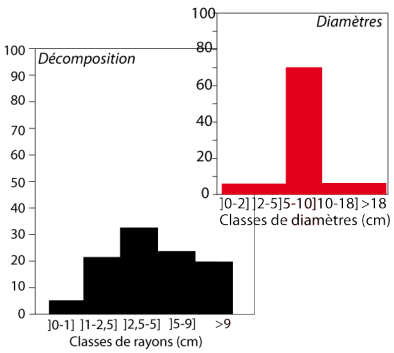
50 - Petits bois, bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires



(suite)

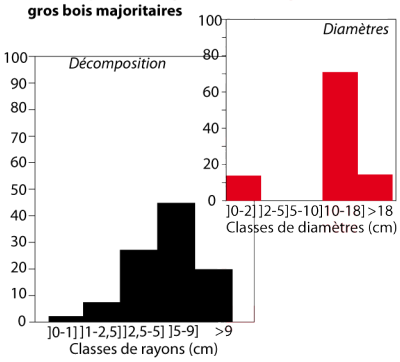
Groupe 3 e : Cinq classes et profils en cloche avec la classe]2,5-5 cm] majoritaire

59 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, bois moyens majoritaires

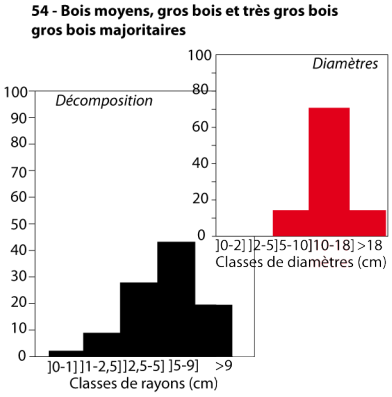


Groupe 3 f : Profils en cloche avec la classe]5-9 cm] majoritaire

46 - Très petits bois, gros bois et très gros bois, gros bois majoritaires

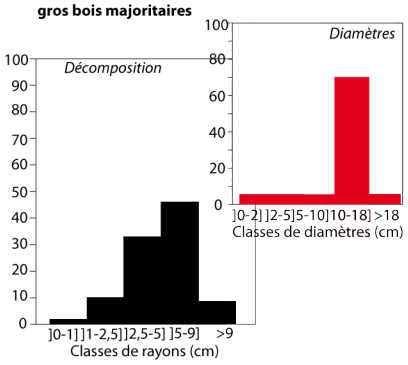


54 - Bois moyens, gros bois et très gros bois gros bois majoritaires



Groupe 3 g : Profils en cloche avec la classe]5-9 cm] majoritaire et de faible proportion dans la classe >9 cm

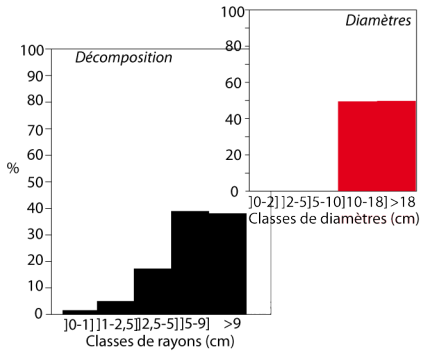
60 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, gros bois majoritaires



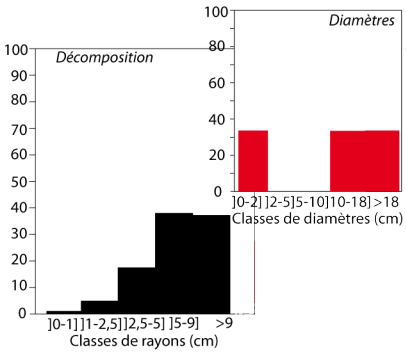
Annexe 13 : Présentation des simulations du groupe 4, cinq classes de rayons représentées

Groupe 4 a : Profils croissants des histogrammes avec peu de différences entre les classes]5-9 cm] et >9 cm

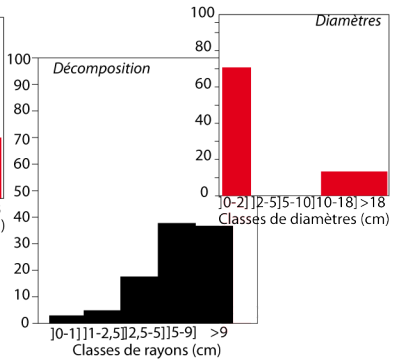
33 - Gros bois et très gros bois, à parts égales



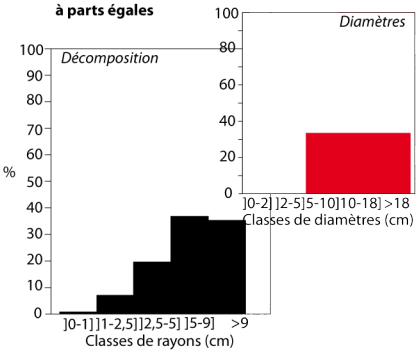
44 - Très petits bois, gros bois et très gros bois à parts égales



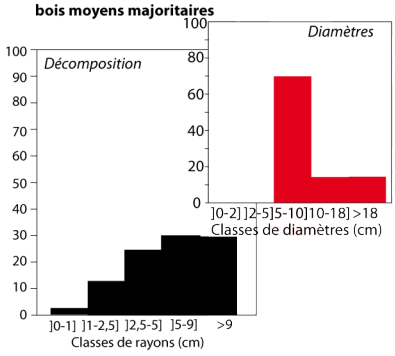
45 - Très petits bois, gros bois et très gros bois très petits bois majoritaires



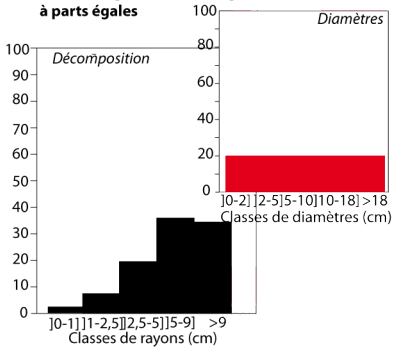
52 - Bois moyens, gros bois et très gros bois, à parts égales



53 - Bois moyens, gros bois et très gros bois , bois moyens majoritaires

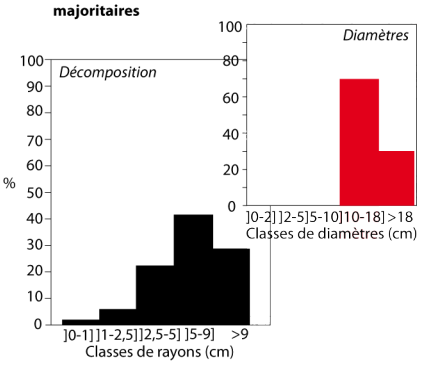


56 - Mélange de toutes les gammes de diamètres à parts égales



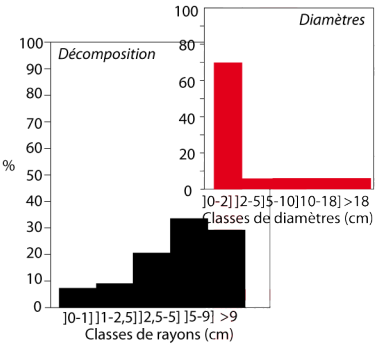
Groupe 4 b : Profils en cloche avec la classe]5-9 cm] majoritaire

34 - Gros bois et très gros bois, gros bois majoritaires

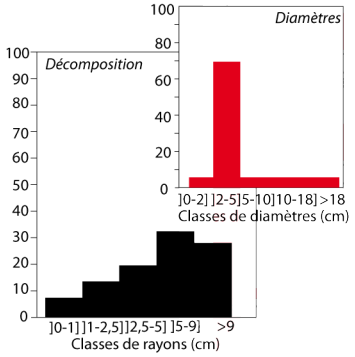


Groupe 4 c : légère différence dans la classe]0-1 cm]

57 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, très petits bois majoritaires

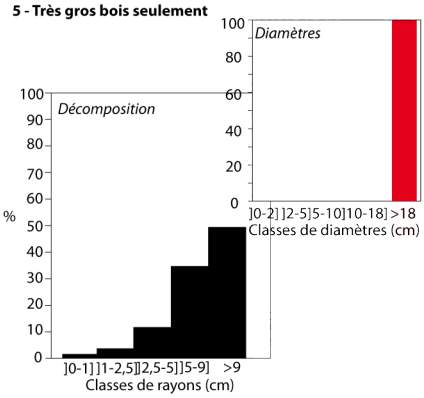


58 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, petits bois majoritaires

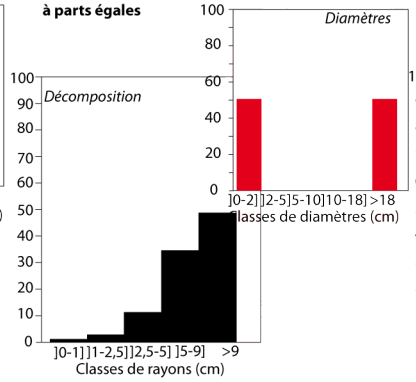


Groupe 4 d : Profils croissants

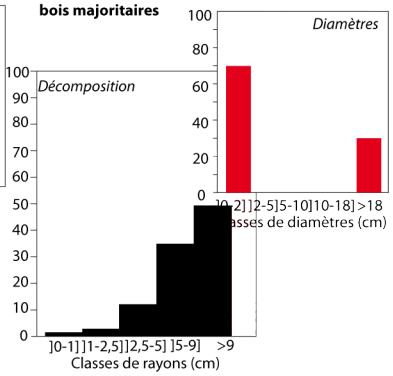
5 - Très gros bois seulement



15 - Très petits bois et très gros bois, à parts égales



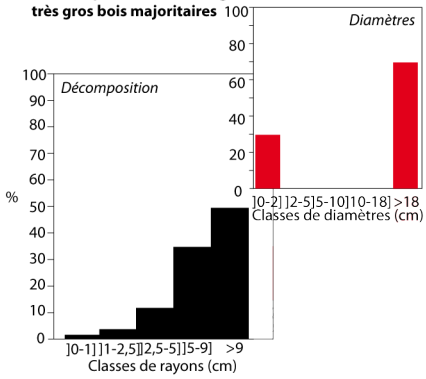
16 - Très petits bois et très gros bois, très petits bois majoritaires



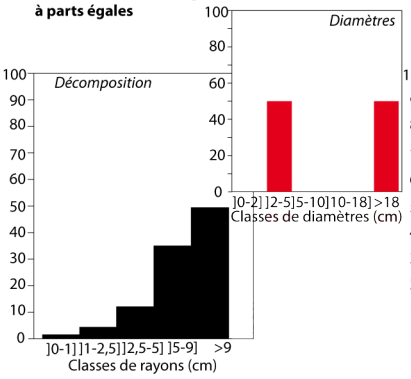
(suite)

Groupe 4 d : Profils croissants (suite)

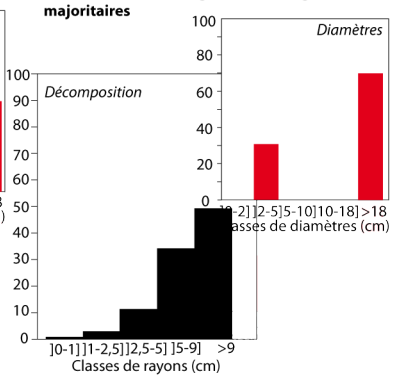
17 - Très petits bois et très gros bois, très gros bois majoritaires



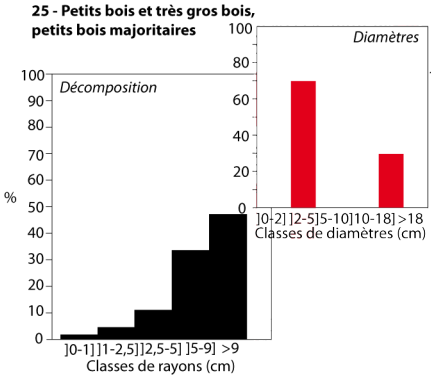
24 - Petits bois et très gros bois à parts égales



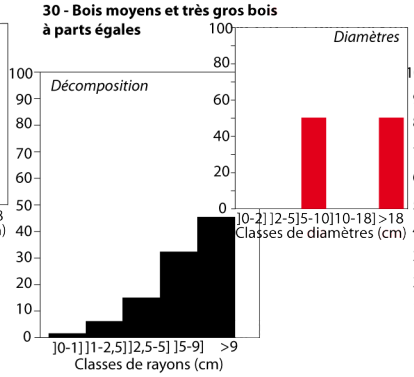
26 - Petits bois et très gros bois, très gros bois majoritaires



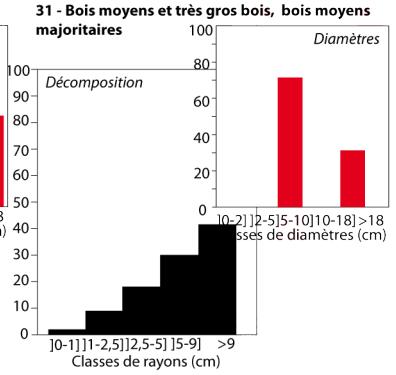
25 - Petits bois et très gros bois, petits bois majoritaires



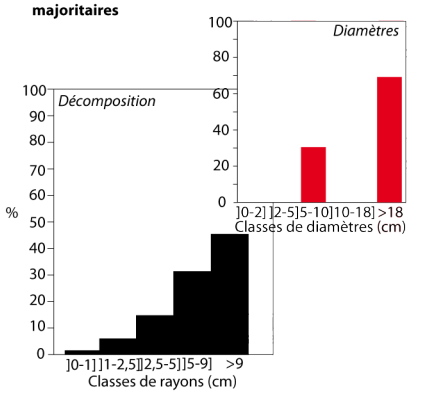
30 - Bois moyens et très gros bois à parts égales



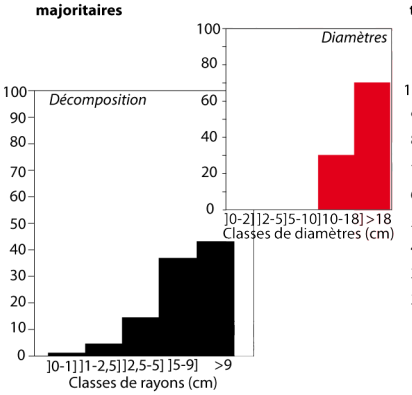
31 - Bois moyens et très gros bois, bois moyens majoritaires



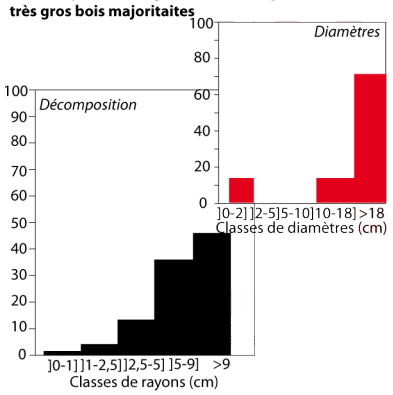
32 - Bois moyens et très gros bois, très gros bois majoritaires



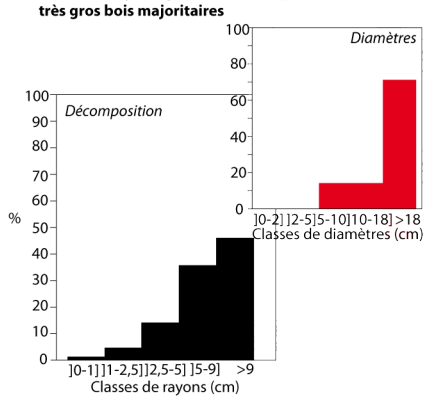
35 - Gros bois et très gros bois, très gros bois majoritaires



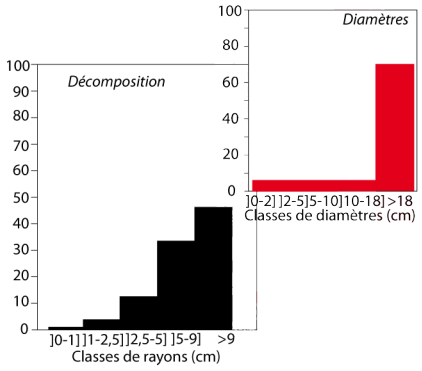
47 - Très petits bois, gros bois et très gros bois très gros bois majoritaires



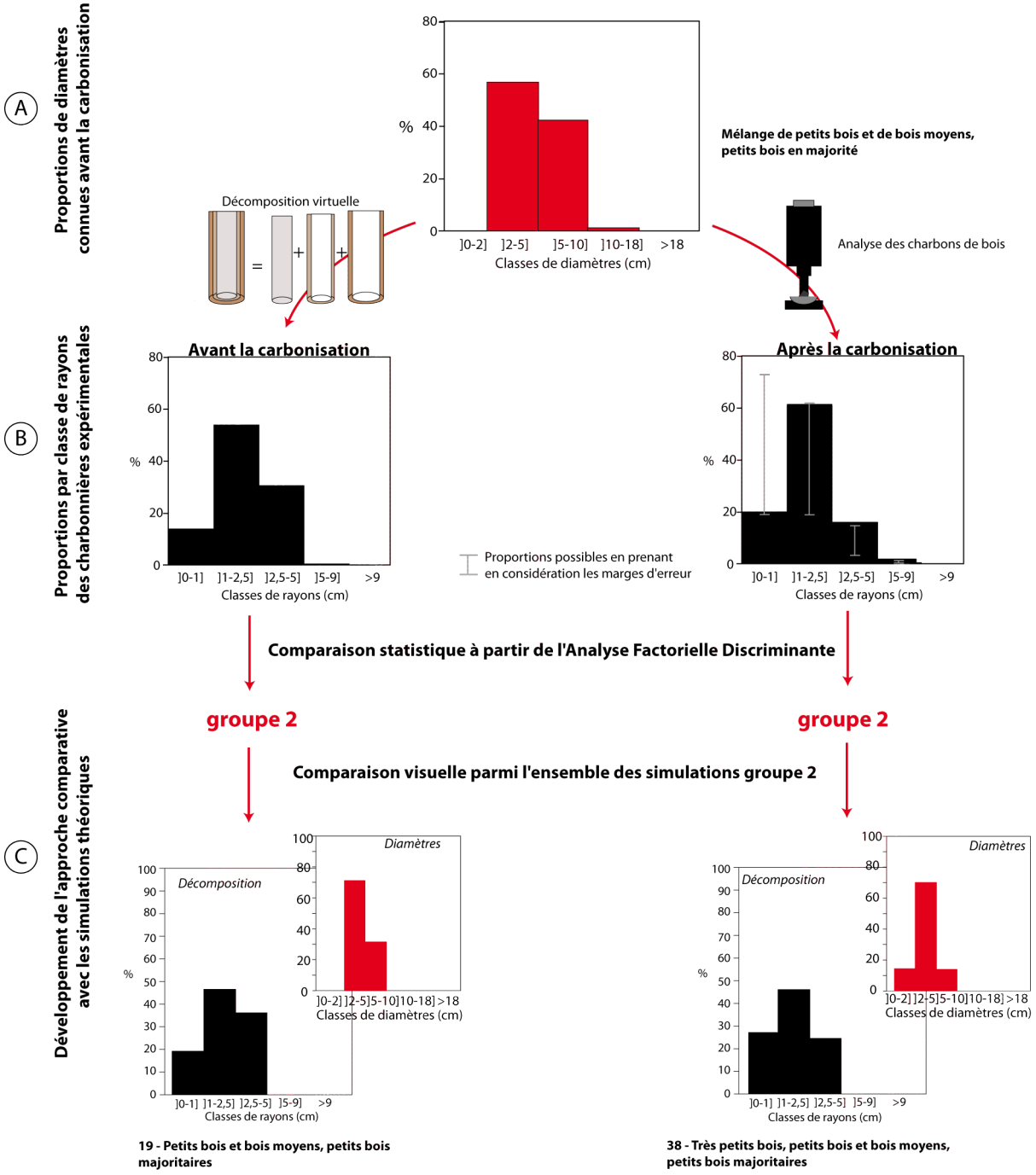
55 - Bois moyens, gros bois et très gros bois, très gros bois majoritaires



61 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, très gros bois majoritaires



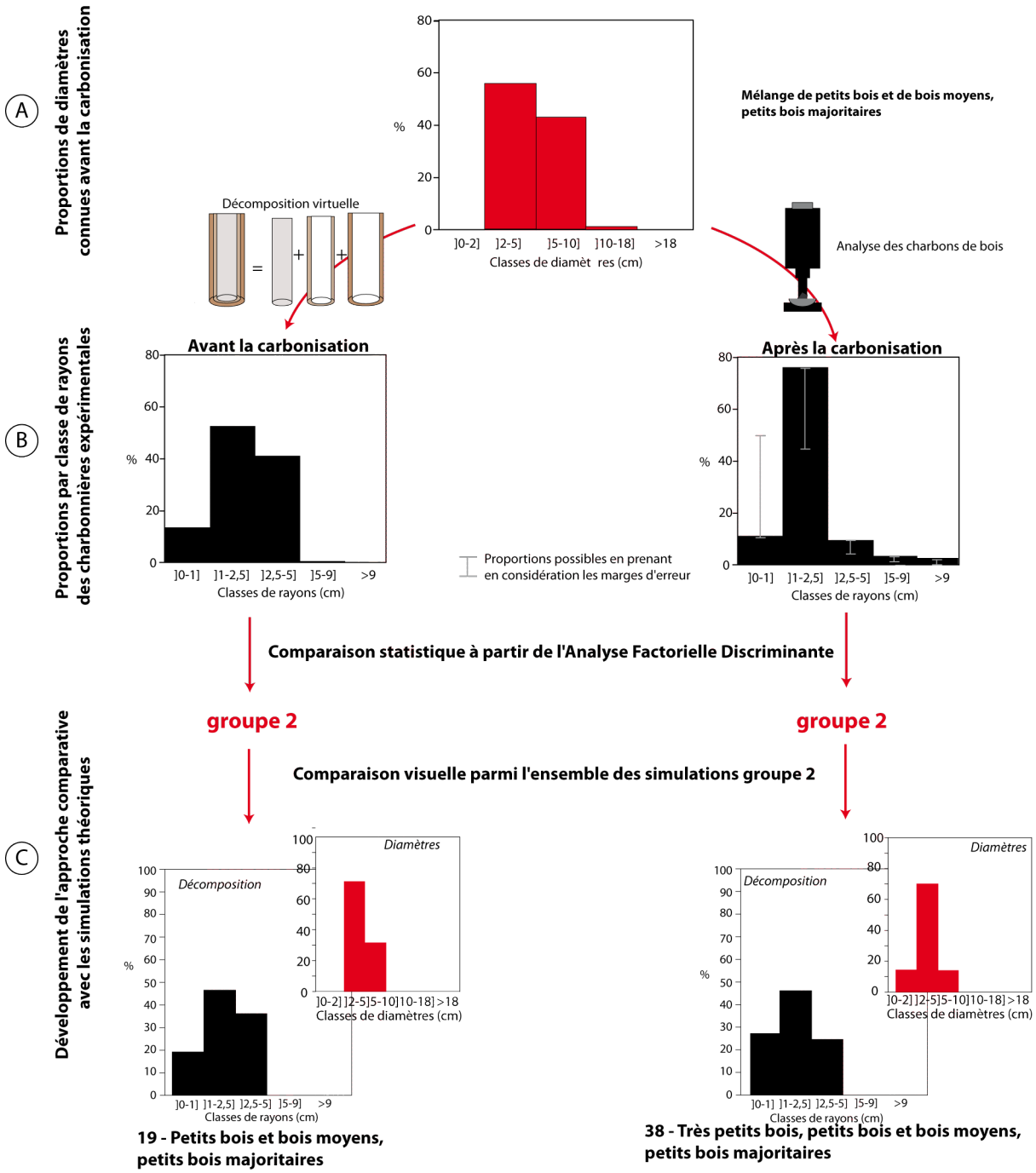
Annexe 14 : Résultats de l'approche comparative sur le hêtre de la charbonnière aux petits diamètres



= > Dominance de petits bois avec ajout de gros bois et de petits bois

Bonne représentation des données avant la carbonisation mais sous évaluation des gros bois sur les données obtenues après la carbonisation

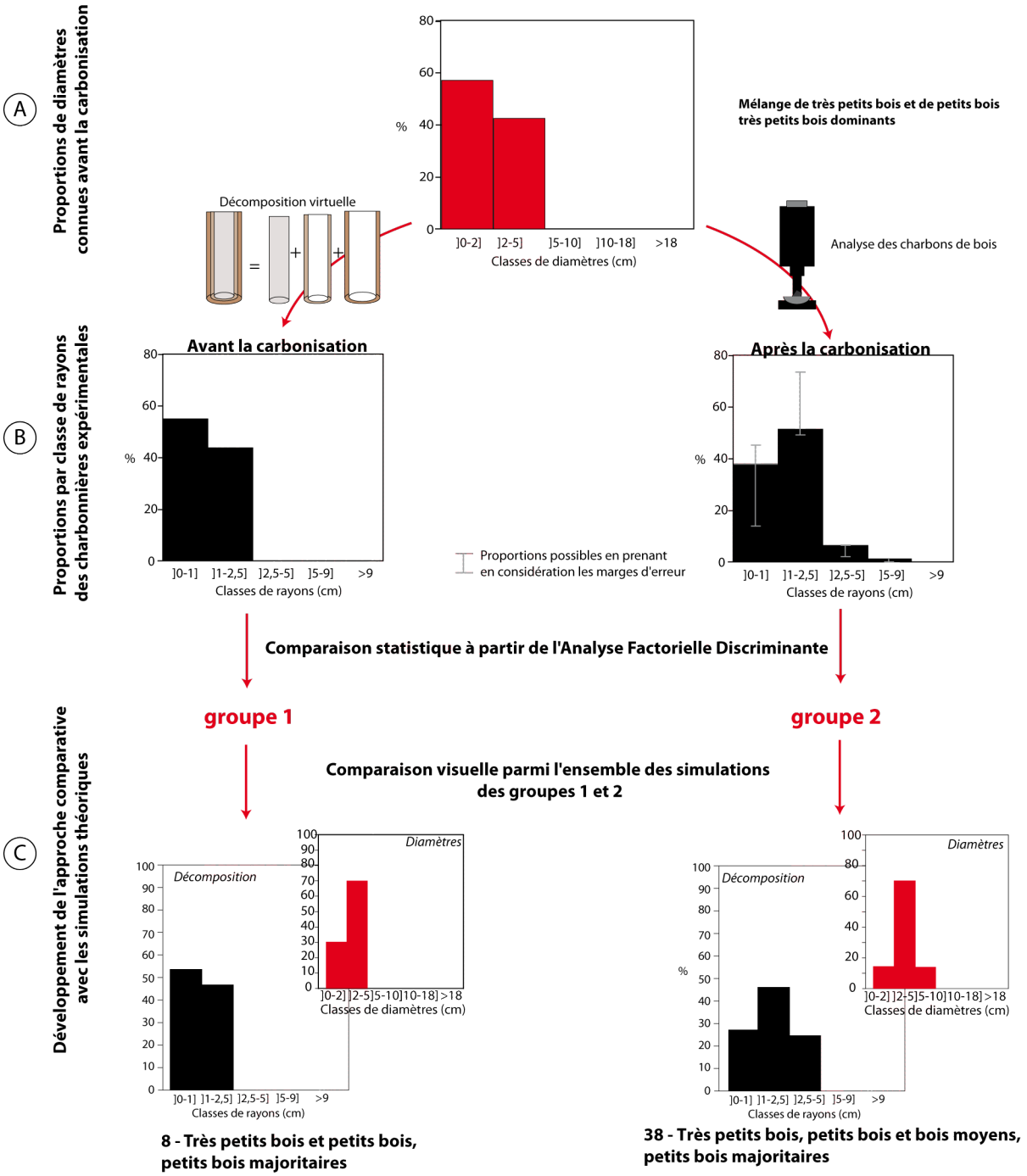
Annexe 15 : Résultats de l'approche comparative sur le chêne de la charbonnière aux petits diamètres



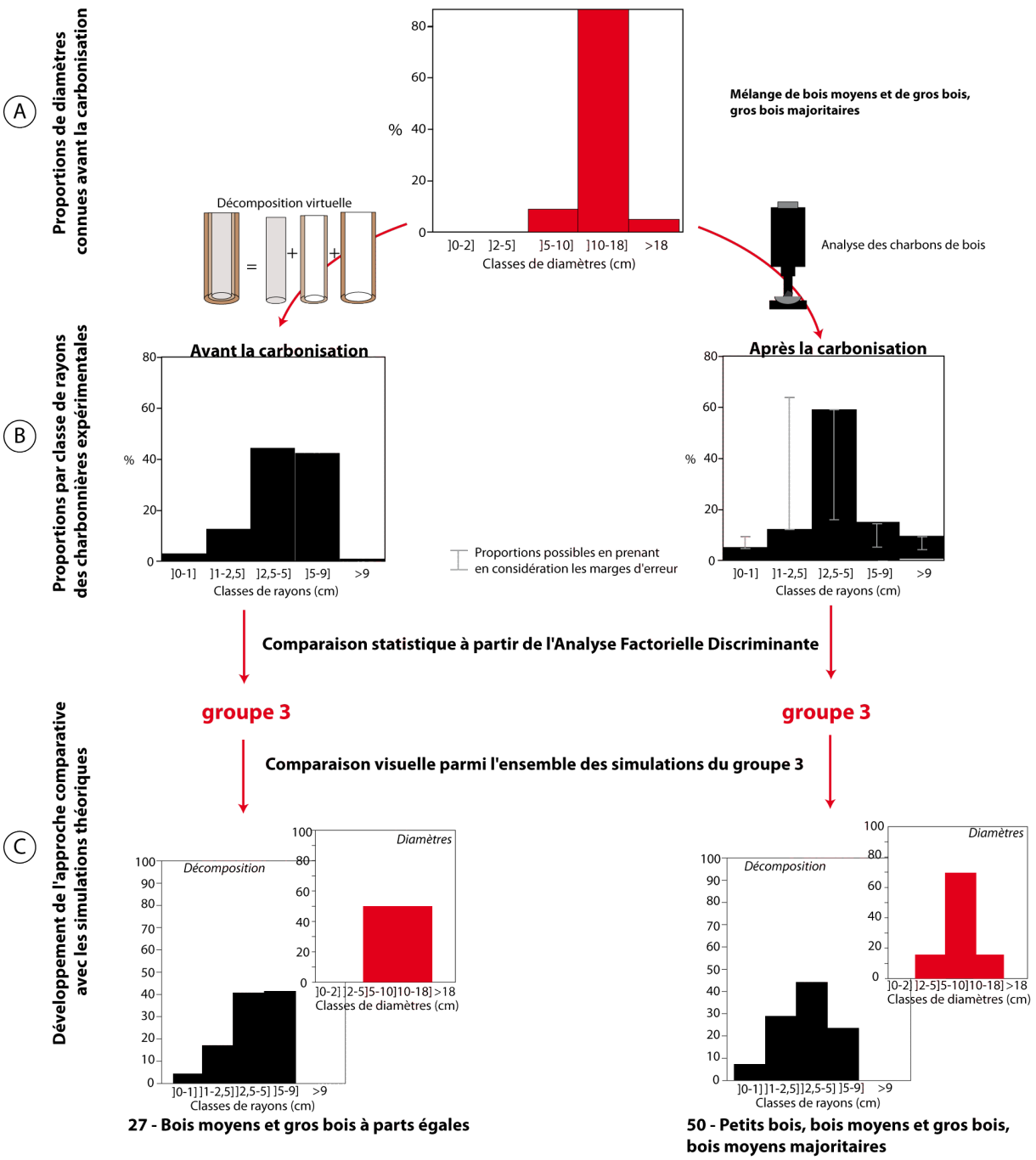
= > Dominance de petits bois avec ajout de bois moyens

Bonne restitution pour les données connues avant la carbonisation mais sous représentation des proportions de bois moyens

Annexe 16 : Résultats de l'approche comparative sur le châtaignier de la charbonnière aux petits diamètres



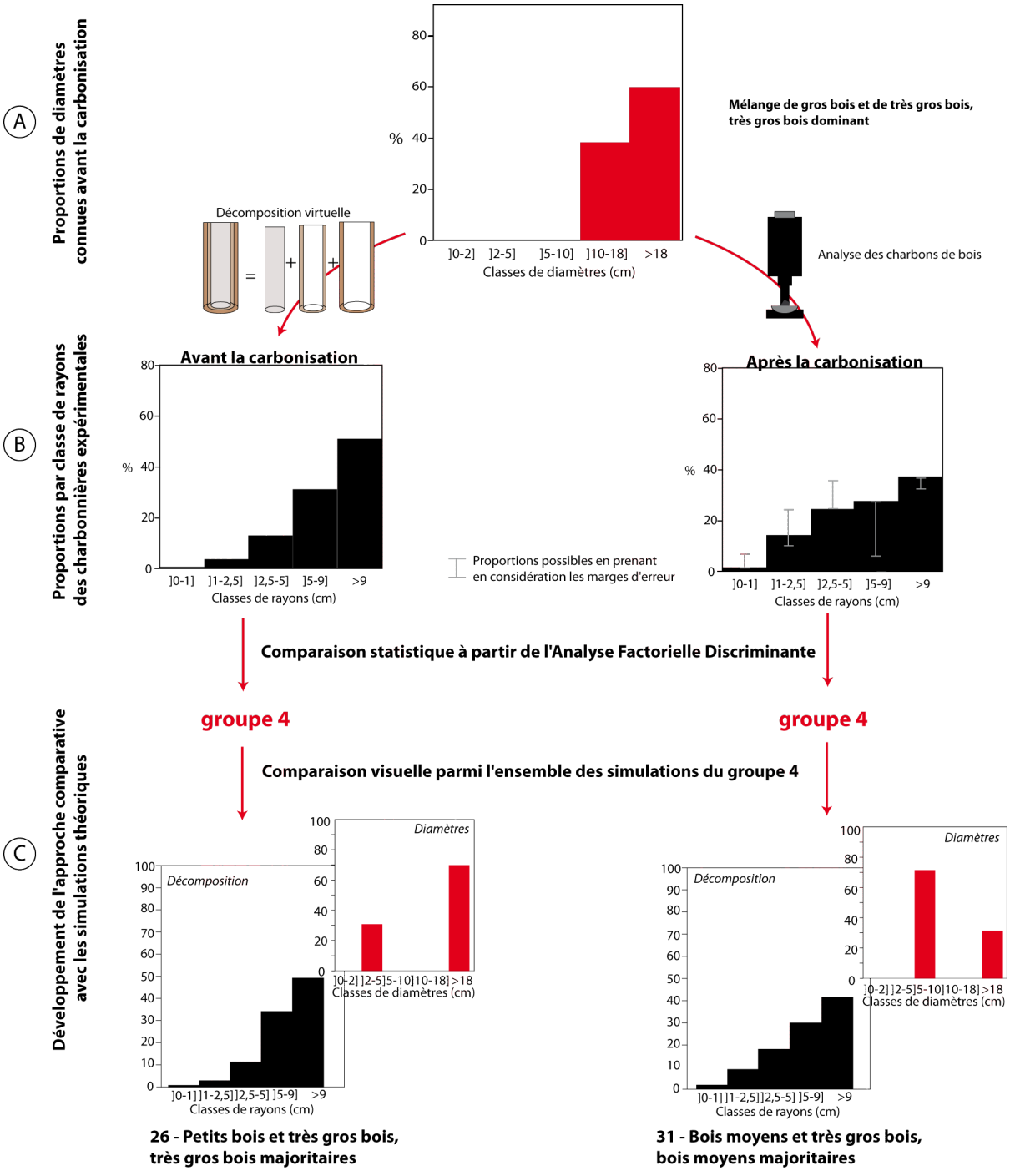
Annexe 17 : Résultats de l'approche comparative sur le hêtre de la charbonnière aux gros diamètres



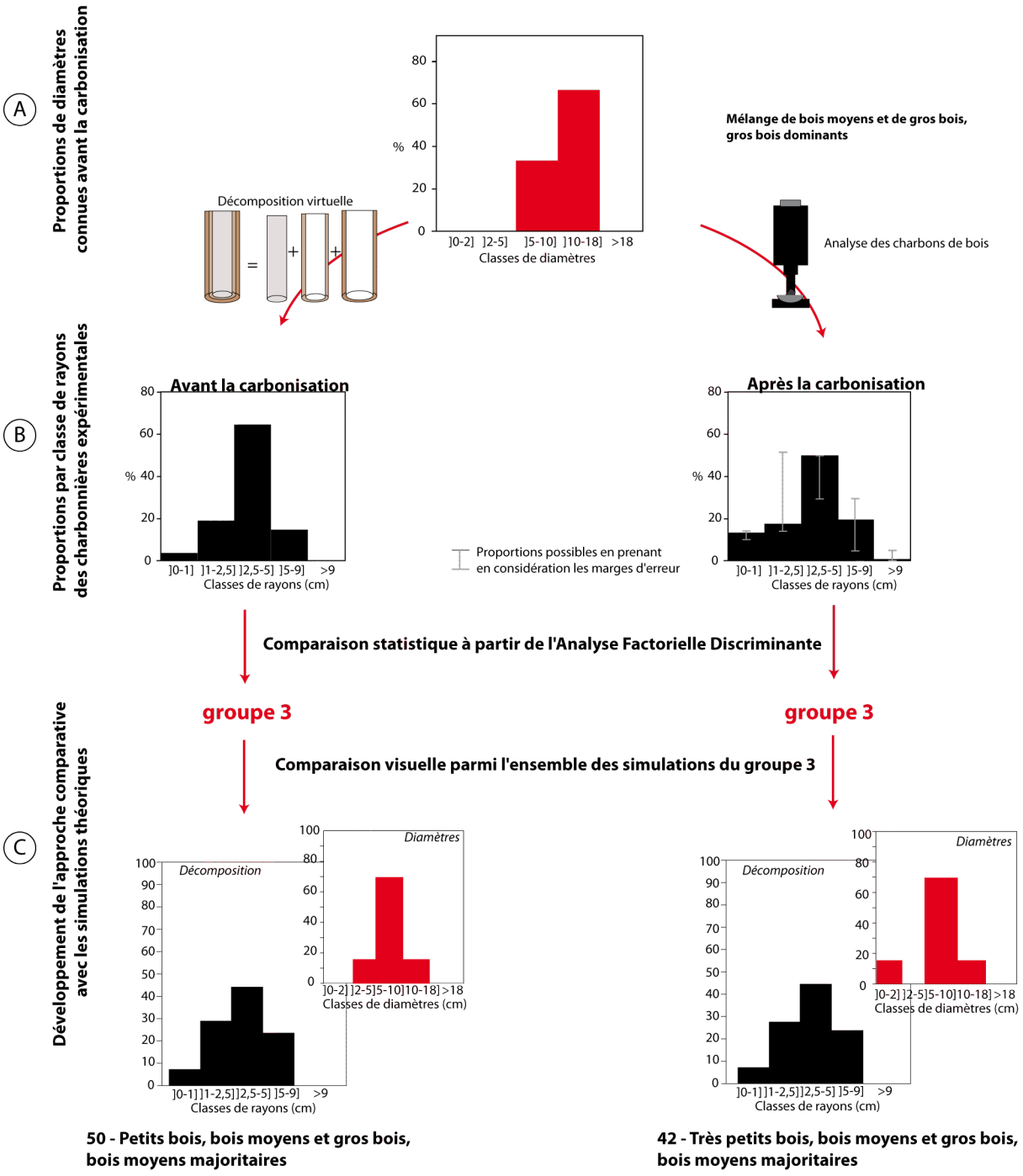
= > Mélange de bois moyens et de gros bois, bois moyens majoritaires

Décalage dans la restitution de la classe majoritaire

Annexe 18 : Résultats de l'approche comparative sur le chêne de la charbonnière aux gros diamètres



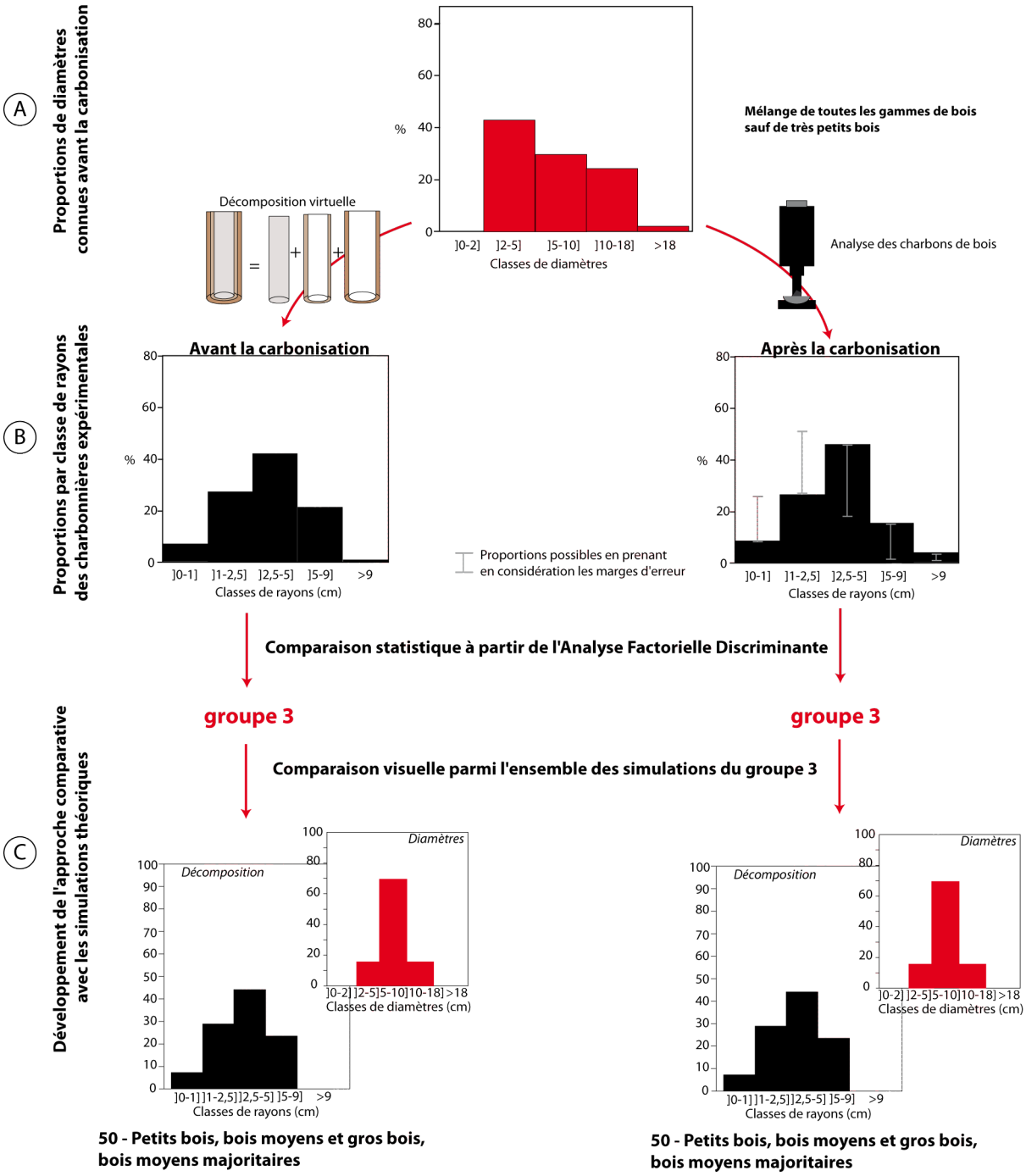
Annexe 19 : Résultats de la démarche comparative sur le châtaignier de la charbonnière aux gros diamètres



= > Dominance de bois moyens avec ajout de gros bois et de petits bois ou de très petits bois

Sous représentation des proportions de gros bois

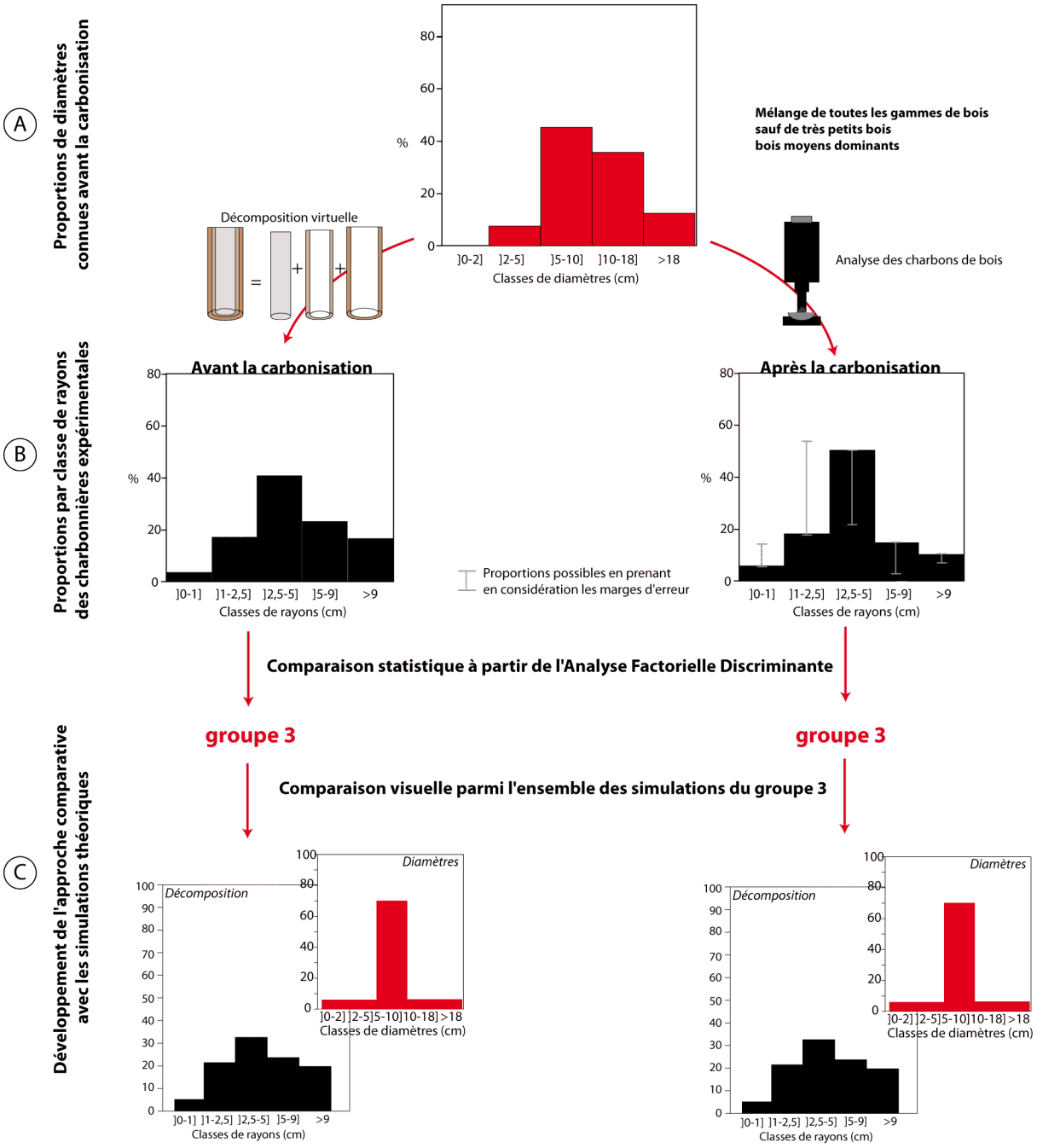
Annexe 20 : Résultats de la démarche comparative sur le hêtre de la charbonnière au mélange de diamètres



= > Mélange de petits bois, bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires

On retrouve les bons diamètres mais pas dans les bonnes proportions

Annexe 21 : Résultats de la démarche comparative sur le chêne de la charbonnière au mélange de diamètres

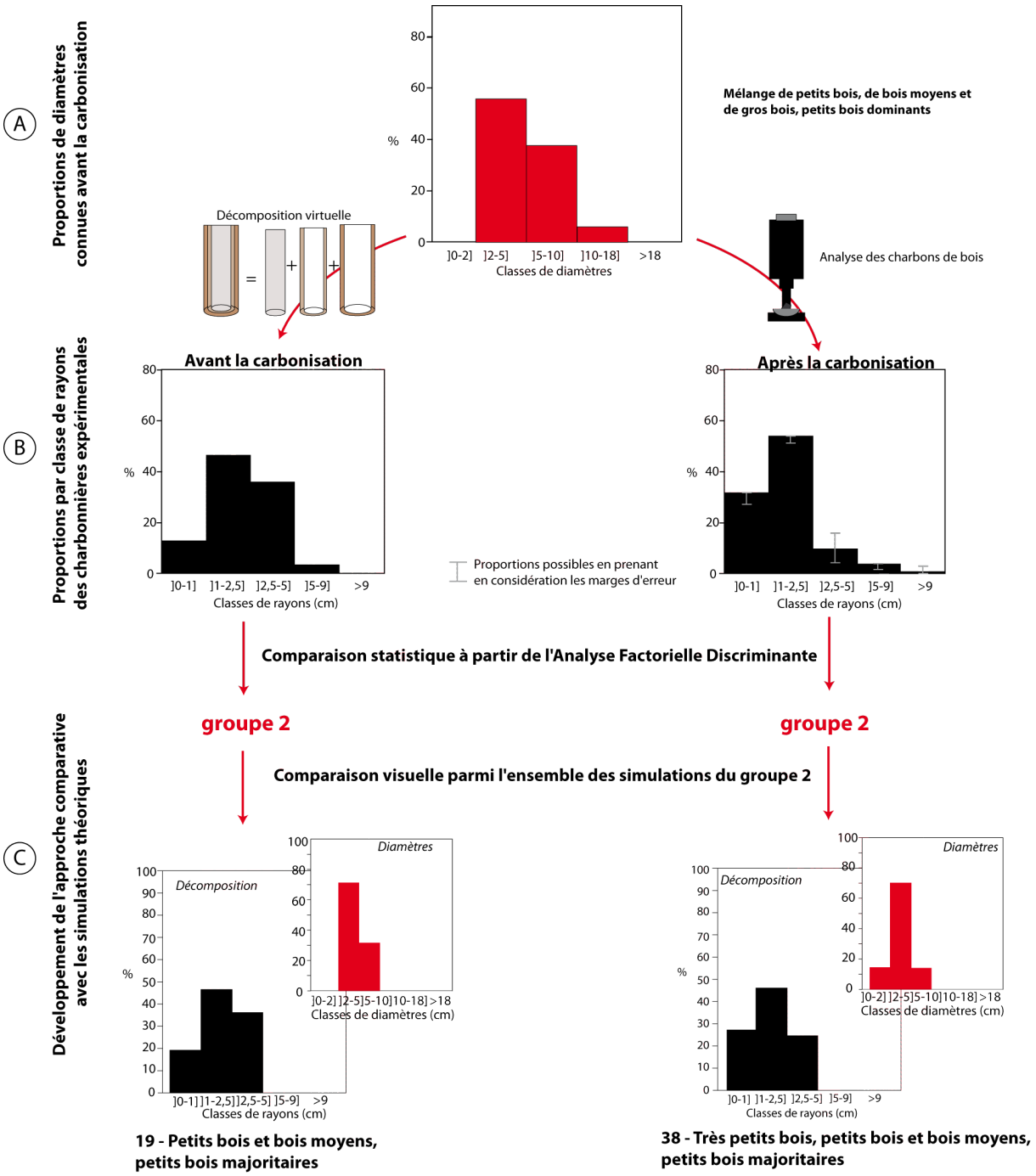


59 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, bois moyens majoritaires

59 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, bois moyens majoritaires

= > Toutes les gammes de diamètres, bois moyens majoritaires

Annexe 22 : Résultats de la démarche comparative sur le châtaignier de la charbonnière au mélange de diamètres



= > Dominance de petits bois avec ajout de bois moyens et de petits bois

Bonne représentation des données avant la carbonisation mais sous évaluation des gros bois sur les données obtenues après la carbonisation

Annexes du chapitre 6

Les annexes du chapitre 6 présentent les résultats de l'analyse dendro-anthracologique de chaque charbonnière et cela pour chacun des niveaux étudiés.

Annexe 23 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Vareilles 11

Annexe 24 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Vareilles 47

Annexe 25 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Countrasts 1

Annexe 26 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Countrasts 2

Annexe 27 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Corrizo 6

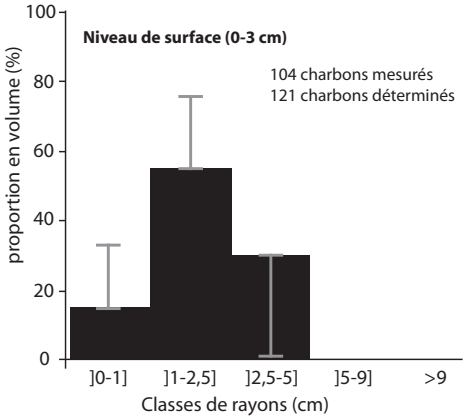
Annexe 28 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Samouse 9

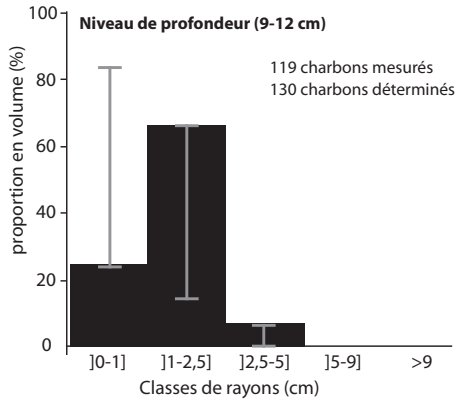
Annexe 29 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Bourrassade 5

Annexe 30 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Bourrassade 22

Annexe 23 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Vareilles 11

Résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique sur les charbonnières

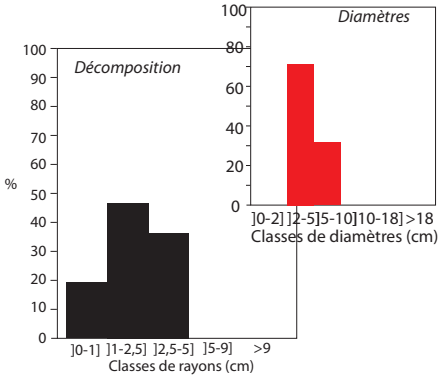




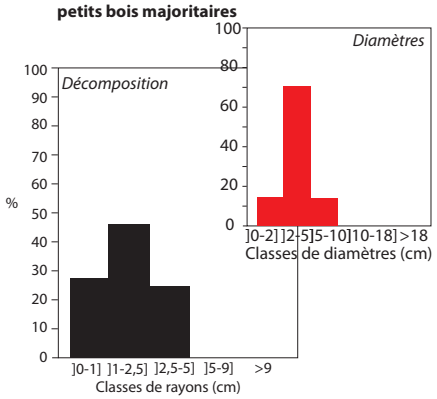
Proportions possibles en prenant en considération les marges d'erreur

Simulations s'approchant le plus des données archéologique

19 - Petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires

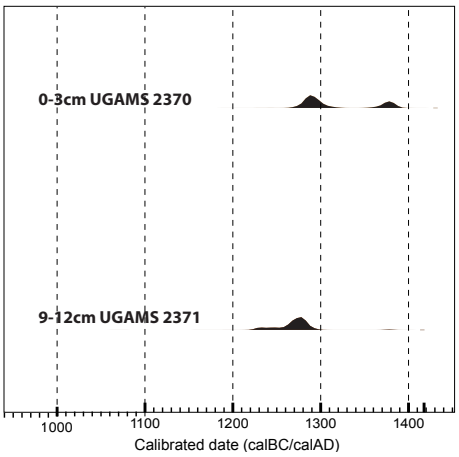


38 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires



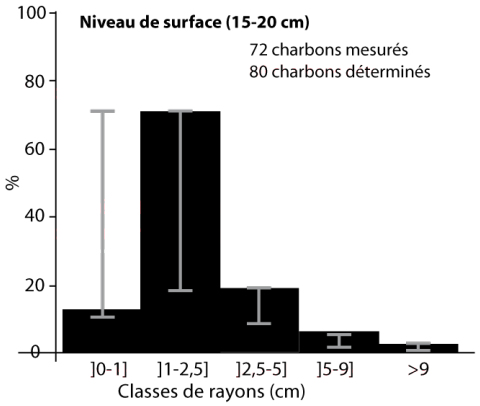
= > pas d'évolution de diamètre des bois entre les deux niveaux

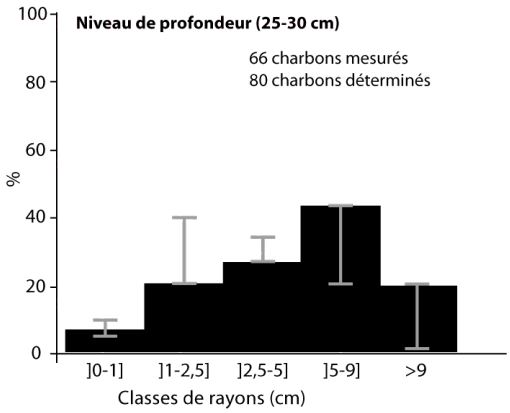
Datations des deux niveaux étudiés



Annexe 24 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Vareilles 47

Résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique sur les charbonnières

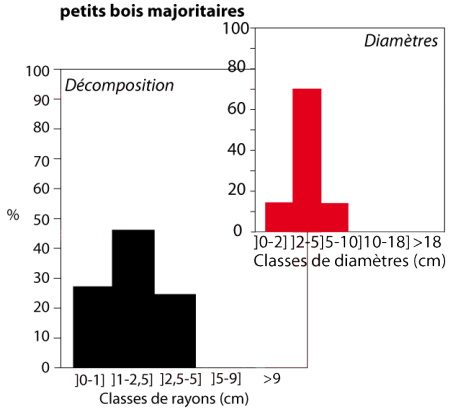




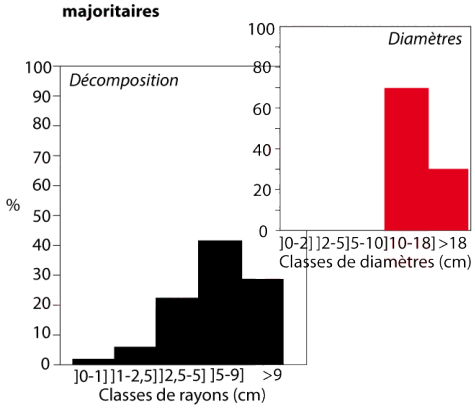
Proportions possibles en prenant en considération les marges d'erreur

Simulations s'approchant le plus des données archéologiques

38 - Très petits bois, petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires

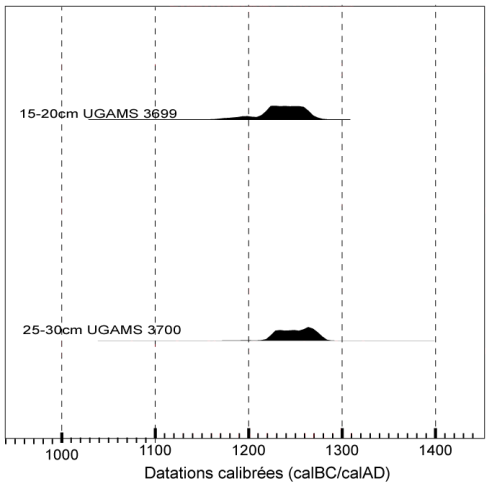


34 - Gros bois et très gros bois, gros bois majoritaires



= > diminution du diamètre des bois entre les deux niveaux

Datations des deux niveaux étudiés

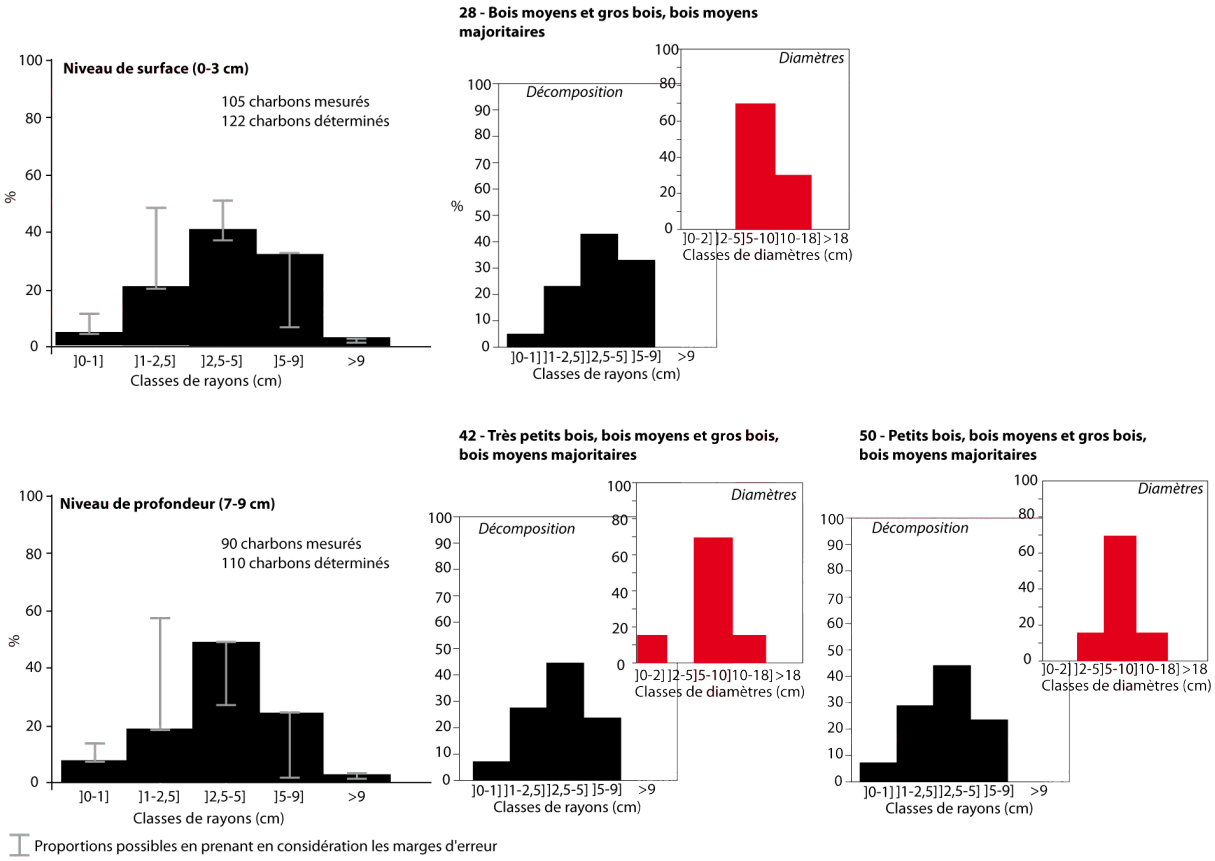


Annexe 25 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière

Countrasts 1

Résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique sur les charbonnières

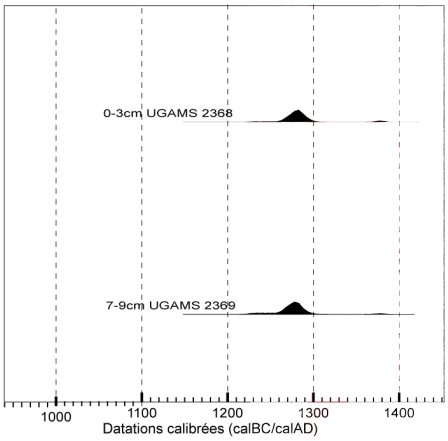
Simulations s'approchant le plus des données archéologiques



Proportions possibles en prenant en considération les marges d'erreur

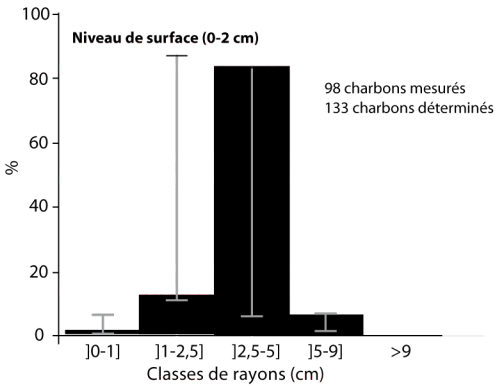
= > pas d'évolution de diamètre entre les deux niveaux

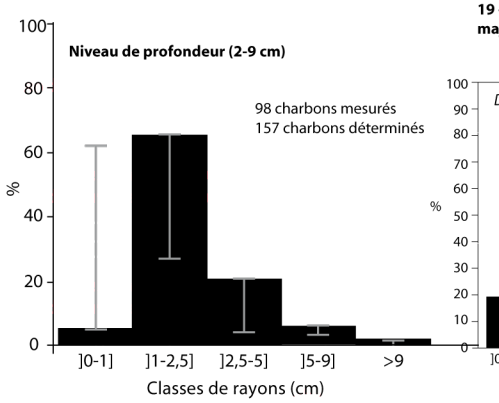
Datations des deux niveaux étudiés



Annexe 26 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Countrasts 2

Résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique sur les charbonnières

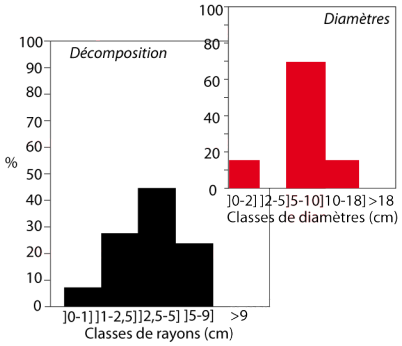




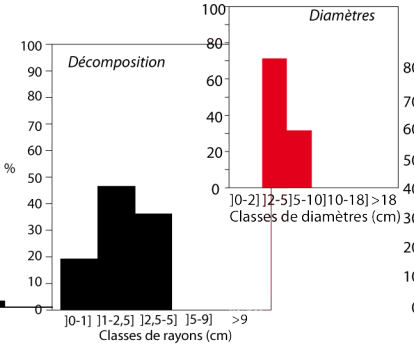
Proportions possibles en prenant en considération les marges d'erreur

Simulations s'approchant le plus des données archéologiques

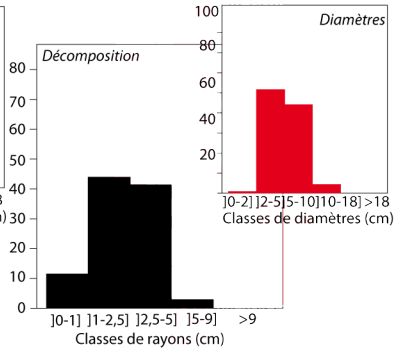
42 - Très petits bois, bois moyens et gros bois, bois moyens majoritaires



19 - Petits bois et bois moyens, petits bois majoritaires

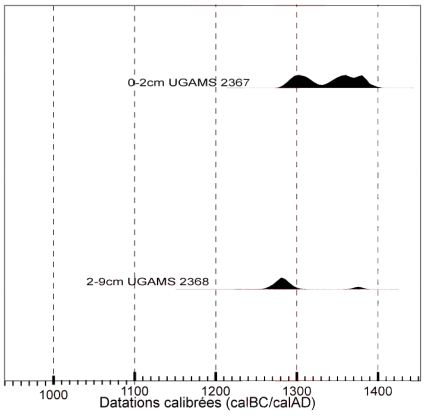


Histogramme du taillis de châtaignier âgé de 12 ans



= > augmentation du diamètre des bois entre les deux niveaux

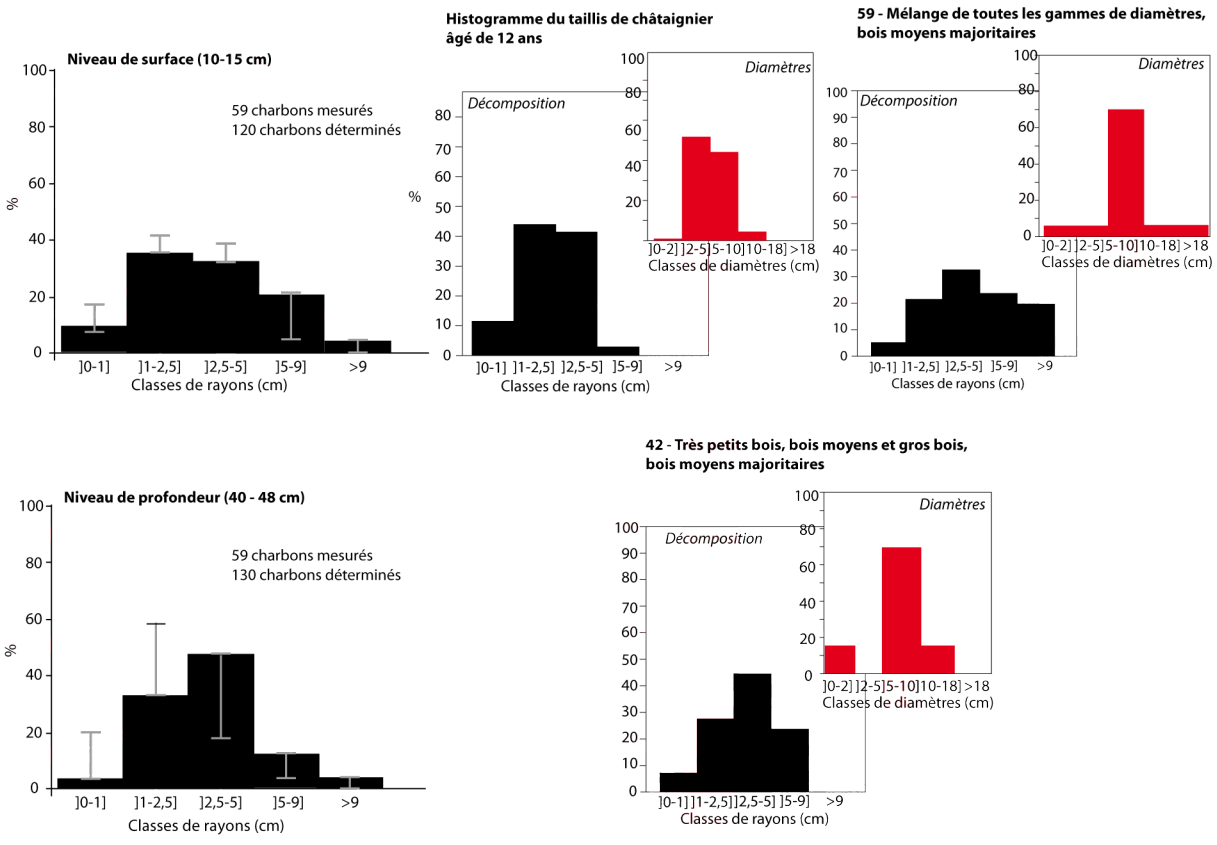
Datations des deux niveaux étudiés



Annexe 27 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Corrizo 6

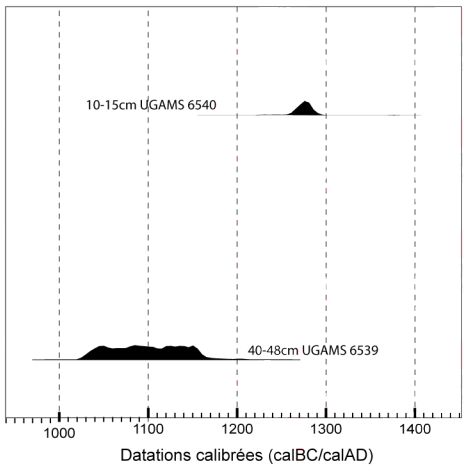
Résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique sur les charbonnières

Simulations s'approchant le plus des données archéologiques



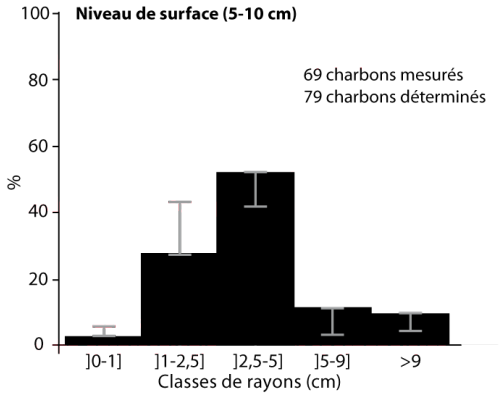
= > pas d'évolution de diamètre entre les deux niveaux

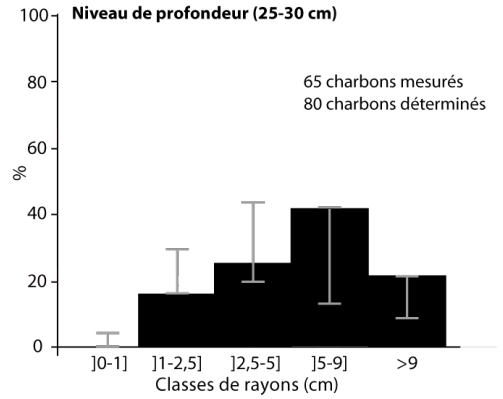
Datations des deux niveaux étudiés



Annexe 28 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Samouse 9

Résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique sur les charbonnières

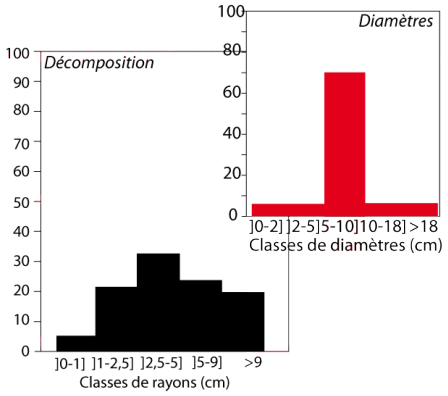




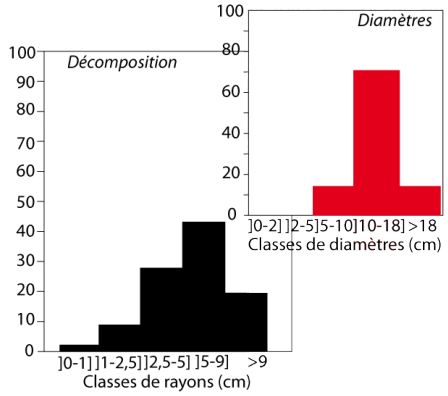
Proportions possibles en prenant en considération les marges d'erreur

Simulations s'approchant le plus des données archéologiques

59 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, bois moyens majoritaires

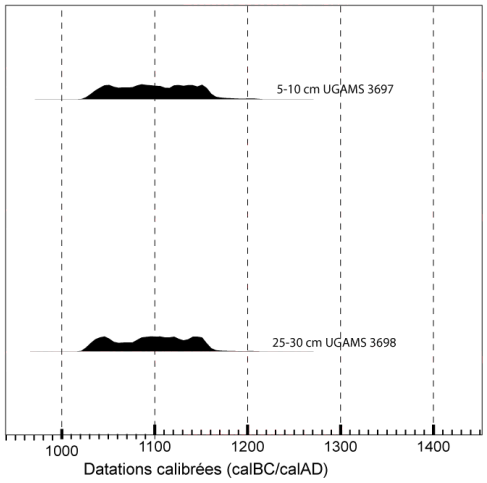


54 - Bois moyens, gros bois et très gros bois gros bois majoritaires



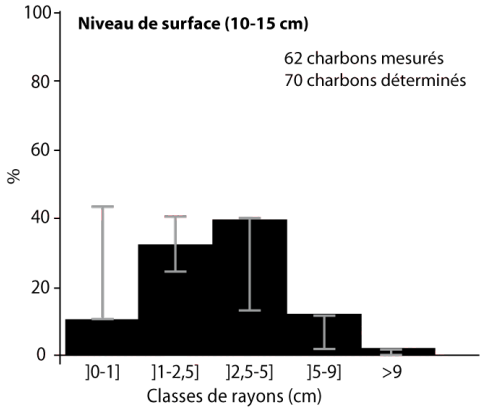
= > diminution du diamètre des bois entre les deux niveaux

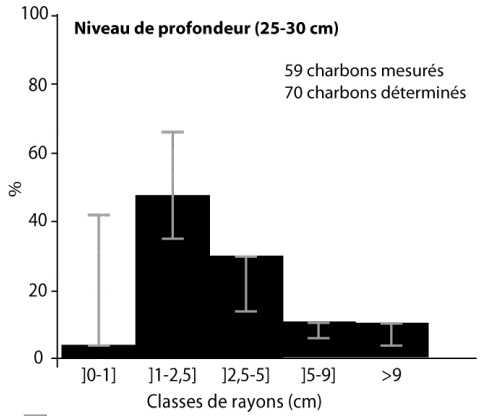
Datations des deux niveaux étudiés



Annexe 29 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Bourrassade 5

Résultats obtenus par l'analyse dendro-anthracologique sur les charbonnières

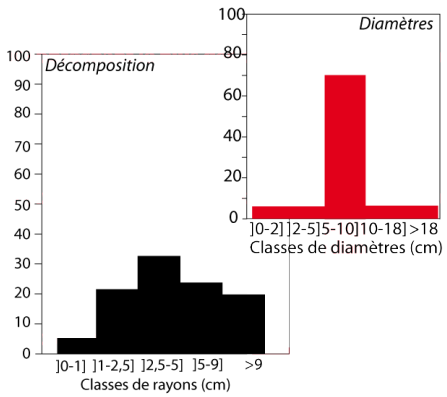




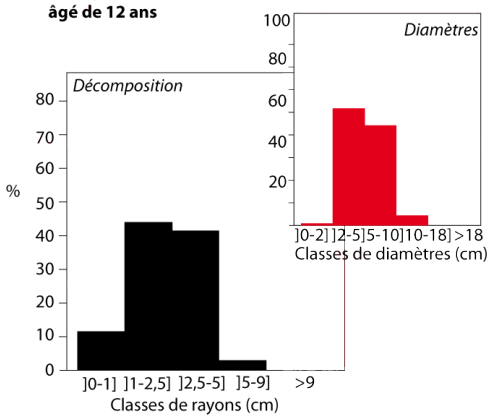
Proportions possibles en prenant en considération les marges d'erreur

Simulations s'approchant le plus des données archéologiques

59 - Mélange de toutes les gammes de diamètres, bois moyens majoritaires

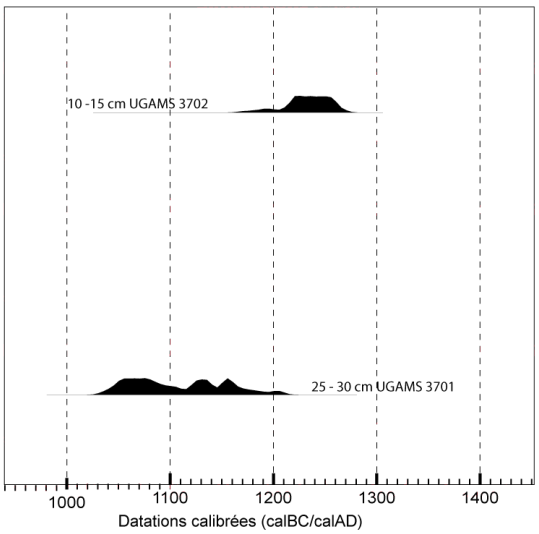


Histogramme du taillis de châtaignier âgé de 12 ans

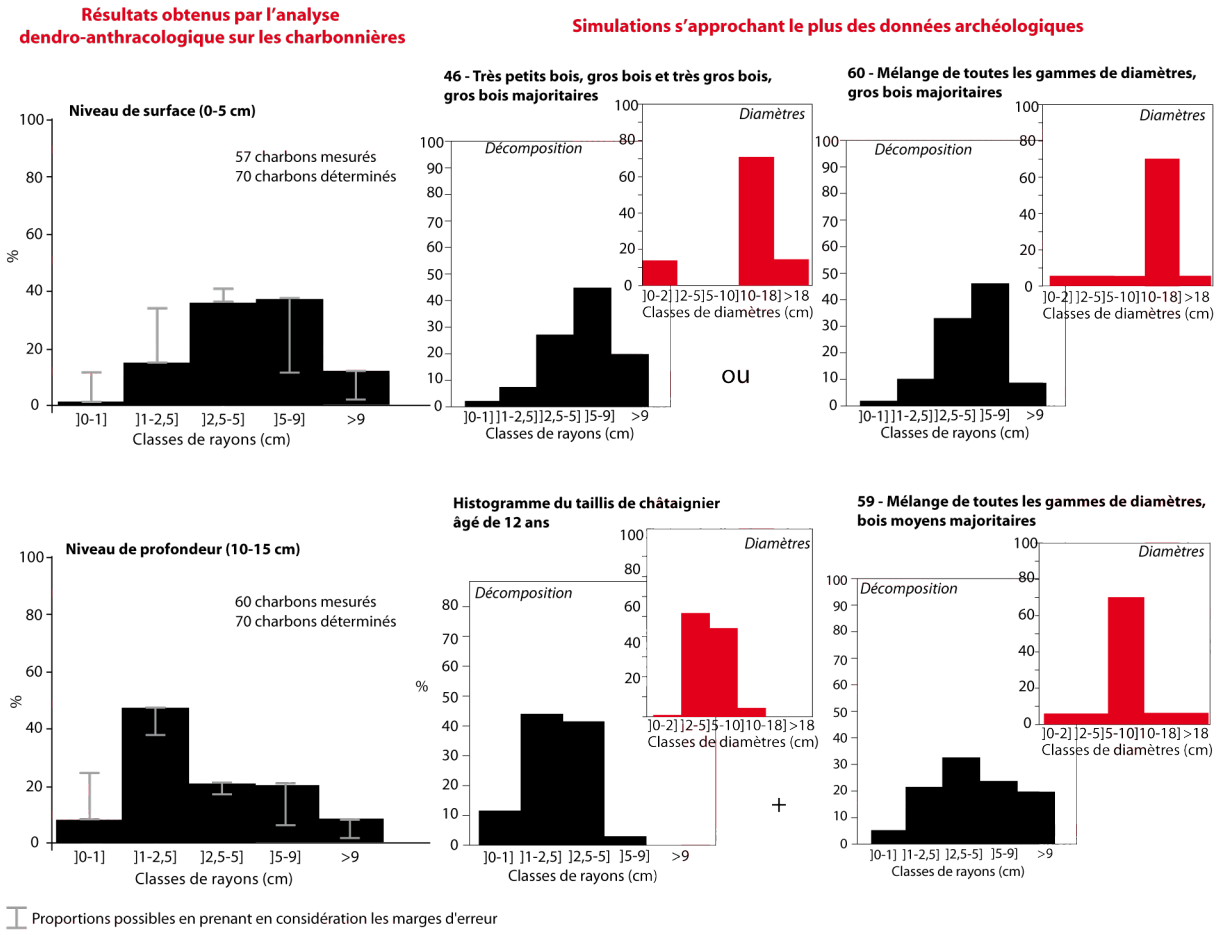
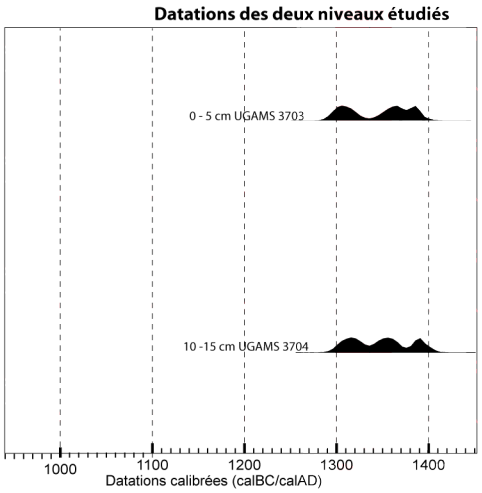


= > augmentation du diamètre des bois entre les deux niveaux

Datations des deux niveaux étudiés



Annexe 30 : Résultats de l'étude dendro-anthracologique de la charbonnière Bourrassade 22



= > augmentation du diamètre des bois entre les deux niveaux