



HAL
open science

Caractérisation du charbonnage moderne et contemporain bisontin (Franche-Comté, France) et de son impact sur les peuplements forestiers : le cas de la forêt de Chailluz

Aurore Dupin

► **To cite this version:**

Aurore Dupin. Caractérisation du charbonnage moderne et contemporain bisontin (Franche-Comté, France) et de son impact sur les peuplements forestiers : le cas de la forêt de Chailluz. Archéologie et Préhistoire. Université Bourgogne Franche-Comté, 2018. Français. NNT : 2018UBFCC033 . tel-02302078

HAL Id: tel-02302078

<https://theses.hal.science/tel-02302078>

Submitted on 1 Oct 2019

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.

**THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE
FRANCHE-COMTE**

Préparée à l'université de Bourgogne Franche-Comté, Besançon

Ecole doctorale SEPT (n°594)

Doctorat d'Archéologie

**Caractérisation du charbonnage moderne et contemporain bisontin
(Franche-Comté, France) et de son impact sur les peuplements forestiers.
Le cas de la forêt de Chailluz.**

par

Aurore DUPIN

Thèse présentée et soutenue à Besançon, le 18 décembre 2018

Composition du Jury :

Mr. Dominique Marguerie

Directeur de recherche, UMR 6553 ECOBIO, Rennes

Rapporteur

Mme. Aline Durand

Professeur, UMR 6566 CReAAH, Le Mans

Rapporteur

Mr. Emmanuel Garnier

Directeur de recherche, CNRS, UMR 6249 Chrono-Environnement, Besançon

Examineur

Mr. Vincent Robin

Maître de conférences, UMR 7360 LIEC, Metz

Examineur

Mme. Gauthier, Emilie

Professeur, UMR 6249 Chrono-Environnement, Besançon

Directrice de thèse

Mr. Girardclos, Olivier

Ingénieur d'étude, CNRS, UMR 6249 Chrono-Environnement, Besançon

co-encadrant

Mme. Alexa Dufraisse

Chargé de recherche, MNHN, UMR 7209 Archéozoologie, Archéobotanique : sociétés, pratiques et environnements

co-encadrante

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de thèse, Emilie Gauthier, pour son écoute, sa réactivité et sa disponibilité, en particulier durant cette dernière année de thèse qui fut parsemée de remises en question. Je remercie tout particulièrement Olivier Girardclos, pour son soutien indéfectible durant ces 5 années de thèse, tant d'un point de vue professionnel que personnel. Il a été pour moi un enseignant marquant de ma vie et de ma vie d'anthracologue ... Je remercie également Alexa Dufraisse pour avoir accepté de faire partie de mon encadrement de thèse, et pour sa disponibilité, notamment lors de mes déplacements à Paris.

Je remercie les membres de mon jury, Emmanuel Garnier et Aline Durand d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse malgré sa forme quelque peu éloigné de la forme conventionnelle usitée dans leur milieu de recherche. Je remercie également Dominique Marguerie d'avoir si minutieusement rapporté ce travail alors que d'autres préoccupations l'occupaient légitimement en cette fin d'année 2018. Enfin, je remercie Vincent Robin, examinateur de ma thèse, pour son jugement et son opinion sur certaines problématiques de ma thèse qui ont conduit à des réflexions que je souhaite pouvoir développer d'avantage dans un futur proche.

Je remercie les financeurs de cette thèse et les différentes structures qui m'ont accueillie durant ces 5 ans : La région Franche-Comté, la MSHE Claude-Nicolas Ledoux, le laboratoire Chrono-Environnement, le MNHN de Paris.

Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans la collaboration de l'ONF, qui nous a donné accès à des informations précieuses concernant les sols et le couvert forestier de Chailluz. Je remercie également l'équipe travaillant aux archives municipales de Besançon pour m'avoir permis de consulter l'ensemble des archives que je souhaitais feuilleter.

Pour les sorties terrain et le partage de connaissances, je remercie chaleureusement Catherine Fruchart, Daniel Daval, Jean-Paul Grosbois, Vincent Driget, Guillaume Hulin, Cyril Durand et son équipe. J'ai aussi une douce pensée pour Bernard Arnould, qui avait partagé avec nous sa passion pour l'histoire des charbonniers de sa région. Ces remerciements ne pourraient pas être complets sans évoquer les charbonniers des baraques du 14, avec qui j'ai passé plusieurs jours de franche camaraderie et de partage. Un grand merci à Pascal, charbonnier, et ami de la famille, pour cette charbonnière très fumeuse !

Pour le soutien technique, le soutien moral, l'aide administrative, le partage de connaissance, les relectures de manuscrit, et plus encore !, je remercie la famille Chrono-Environnement : Jean-Daniel, Charles-Henri, Renaud, Sylvie, Agnès, Catherine, Mickaël, Didier, Dominique, Isabelle, Laurent, Pierre, Benjamin, Charles, Quentin, Caroline, Fanny, Flavien. Ce fut un plaisir de travailler dans cette maison.

Plus que des collègues, clairement des amis, je remercie Typhaine, Céline, Amandine, Anne-Lise, Damien et Kévin avec qui j'ai partagé mon quotidien, mes doutes, mes joies, mes peines, mes pintes, des parties de tarot, des repas au ru, des clopes, des cafés, des barbecues, du rugbytouch... etc. Merci de m'avoir porté et supporté jusqu'à la fin de ce travail.

Je remercie, avec une affection toute particulière, ma bonne étoile qui m'a aidé à passer un cap important dans ma vie, cette fameuse nuit de juin 2018. Sans toi, ce manuscrit n'aurait jamais vu le jour. Je suis sûre que tu te reconnaîtras ...

Enfin, parce que je les aime sans commune mesure, et pour tout l'amour qu'ils me portent tous les jours, je remercie ma maman et mon papa. Ce travail, c'est essentiellement à vous que je le dois.

Table des illustrations	11
Introduction	17
Evolution du couvert forestier et des impacts anthropiques au cours de l'Holocène en Franche-Comté	21
La forêt de Chailluz, forêt franc-comtoise.....	22
Le charbonnage en Franche-Comté	24
Histoire du charbonnage	24
Procédés utilisés pour la fabrication du charbon de bois	24
Le charbonnage et l'archéologie	26
Problématiques et plan de thèse.....	26
Sources et bibliographie	30
Chapitre 1 : Matériel et méthodes	37
1. Site d'étude	39
1.1 Besançon, capitale de Franche-Comté : contexte historique	39
1.2 Les forêts bisontines du XVIII ^{ème} siècle	40
2. Le matériel d'étude : les plateformes de charbonnage de la forêt de Chailluz.....	46
3. Méthodes : L'anthracologie	48
3.1 Généralités	48
3.2 Les outils de l'anthracologie	49
Sources et bibliographie	51
Chapitre 2 : Apport des sources historiques pour la quantification des différentes productions de bois de la forêt de Chailluz au XVIII^{ème} siècle. La place du charbonnage au sein de cette gestion forestière	55
1. Des archives municipales de Besançon (AMB) encore à étudier	58
1.1 Les listes électorales entre 1824 et 1914, cotées de 1K28 à 1K62	58
1.2 Les registres paroissiaux de 1543 à 1794 (série GG des AMB)	58
1.3 Les registres d'état-civil de 1792 à 1912	58
1.4 Les recensements de la population de 1836 à 1911 (sous-série 1F des AMB).....	59
1.5 Les registres de délibérations du Conseil municipal de 1290 à 2000	59
1.6 Les cadastres de Besançon de 1834 à 1974	60
1.7 Les comptes et impôts.....	60
2. Caractérisation de la productivité et de la production de la forêt de Chailluz au XVIII ^{ème} siècle	60
2.1 Caractérisation et production de bois du quart de réserve de la forêt de Chailluz lors de la première coupe extraordinaire.....	60
2.2 Exploitation et caractérisation de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz.....	66
3. Usages du bois produit en forêt de Chailluz	71
3.1 Bois de chauffage des bisontins aux XVIII ^{ème} – XIX ^{ème} siècles.....	72
3.2 Consommation du bois issu de la forêt de Chailluz par l'industrie métallurgique	81
4. Conclusion.....	92
Sources et bibliographie	94

Chapitre 3 : De l'étude anthracologique des plateformes de charbonnage en forêt de Chailluz, à la compréhension de la pratique99

Abstract/ Résumé.....	103
1. Introduction	105
2. Study area.....	107
2.1 Historical background	107
2.2 Current vegetation.....	107
3. Material and methods	110
3.1 Material: Charcoal kilns.....	110
3.2 Charcoal kilns: sampling.....	110
3.3 Radiocarbon dating	111
3.4 Magnetic susceptibility (MS) on two platforms	111
3.5 Charcoal analysis	112
3.6 Botanical survey.....	113
3.7 Statistical analysis	113
4. Results and discussion.....	113
4.1 Charcoal kiln dating.....	113
4.2 Magnetic susceptibility (MS) on CH29 and CH30.....	115
4.3 Charcoal analysis of 11 charcoal kilns.....	119
5. Conclusions	124
References	126

Chapitre 4 : De la caractérisation des bois charbonnés en forêt de Chailluz à la structure des peuplements présents aux époques moderne et contemporaine 133

1. Introduction	137
2. Matériels et méthodes.....	138
2.1 Peuplements actuels référentiels	138
2.2 Les charbons archéologiques	142
3. Résultats.....	146
3.1 Peuplements actuels référentiels	146
3.2 Les charbons archéologiques	152
4. Interprétations	164
4.1 Caractérisation des peuplements actuels référentiels.....	164
4.2 Discussion générale : Comparaison entre les charbons des plateformes de Chailluz et les référentiels	166
5. Conclusion et perspectives	171
Sources et bibliographie	172

Chapitre 5 : De la caractérisation du profil de sol des plateformes de charbonnage de la forêt de Chailluz, à la productivité de la pratique 179

Abstract/ Résumé.....	183
1. Introduction	184
2. Study area and material	187
3. Methods	188
3.1 Micromorphological study of the profile of soil B of platform CH29	188
3.2 Raman analysis of the profile of soil B of the CH29 platform	192
4. Results	193
4.1 Micromorphological results	193
4.2 Raman results.....	196
5. Discussion.....	199

5.1 Bringing to light charcoal making through the micromorphological study.....	199
5.2 Estimation of the paleotemperatures reached during the charcoal making	200
5.3 Reuse of the CH29 platform	200
5.4 Characterization of the platforms with homogeneous soil profiles	202
6. Conclusion	203
References	204
Chapitre 6 : Discussion générale et conclusions	211
1. Périodes probables d'utilisation des plateformes de charbonnage en forêt de Chailluz et destination du charbon produit	213
1.1 Le charbonnage avant la seconde moitié du XVII ^{ème} siècle	217
1.2 Le charbonnage durant la seconde moitié du XVII ^{ème} siècle.....	217
1.3 Le charbonnage au XVIII ^{ème} siècle.....	218
1.4 Le charbonnage au XIX ^{ème} siècle.....	219
1.5 Le charbonnage au XX ^{ème} siècle.....	220
2. Etat de la forêt de Chailluz au XVIII ^{ème} siècle.....	221
3. Impact du charbonnage sur le couvert forestier de Chailluz aux époques moderne et contemporaine	225
Annexes	231
Annexe 1 : Fonctionnement de la meule traditionnelle comtoise	233
Annexe 2 : Fonctionnement du four métallique utilisé en Franche-Comté.....	237
Annexe 3 : AMB traitant de l'exploitation de la forêt de Chailluz	243
Sources et bibliographie	254

Table des illustrations

<i>Figure i.1 : Localisation des plateformes de charbonnage identifiées par prospection LiDAR, sur la région bisontine (Data : Fruchart, 2014).....</i>	29
<i>Figure 1.1 : Localisation des forêts appartenant à la ville de Besançon au XVIIIème siècle, représentées sur la carte de Cassini datant du dit siècle (Carte : géoportail).....</i>	2941
<i>Figure 1.2 : Carte aérienne actuelle de la forêt de Chailluz, et profils altimétriques associés (Carte : géoportail)</i>	44
<i>Figure 1.3 : Représentation schématique des peuplements forestiers de la forêt de Chailluz en 1750. Les données sont issues de la transcription des AMB DD113 n°8 et 59 et DD132 n°8 par Séverine Dianin.....</i>	46
<i>Figure 1.4 : Plateformes de charbonnage CH29, CH31 et CH41 en forêt de Chailluz (photos : A. Dupin et D. Daval)</i>	47
<i>Figure 1.5 : Photographies des profils de sol des plateformes de charbonnage analysées de la forêt de Chailluz. Identification colorimétrique d'après le code Munsell</i>	48
<i>Figure 2.1 : Chronologie des événements, en rapport avec la première coupe extraordinaire du quart de réserve de la forêt de Chailluz, à partir de la transcription des AMB DD112, DD114, DD115.....</i>	63
<i>Figure 2.2 : Transcription de deux passages de texte figurant dans les procès-verbaux relatifs à l'exploitation en régie de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz (AMB DD119), en 1771 pour le premier passage, et en 1776 pour le second.</i>	69
<i>Figure 2.3 : Représentations graphiques de la table de production d'un taillis-sous-futaie établie par Mathey, et de celle établie par Noirot-Bonnet, présentées dans l'agenda du forestier pour 1900 (Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1900).</i>	71
<i>Figure 2.4 : Passage de texte de l'AMB DD128, datant de 1781, et sa transcription.</i>	75
<i>Figure 2.5 : Approvisionnement de Besançon en bois de chauffage au XVIIIème siècle (Vion-Delphin, 1991). Mise en évidence du bois de chauffage acheminé par flottage sur le Doubs.</i>	77
<i>Figure 2.6 : Communautés affectées au chauffage de Besançon, d'après les lettres patentes du 17 octobre 1735 (Vion-Delphin, 1991, modifié).</i>	78
<i>Figure 2.7 : Les usines métallurgiques comtoises au cours du temps (Lassus, 1968). Les cercles rouges délimitent un champs de distance de 50 km autour de Besançon.</i>	83
<i>Figure 2.8 : La charbonnière expérimentale. A : Caractérisation des charbonnettes utilisées. B : Mise en évidence de la cheminée de la meule une fois montée. C : La meule avant d'être recouverte de feuilles et de terre. D : La meule une fois recouverte de feuilles et de terre.</i>	86
<i>Figure 2.9 : Masses des 10 incuits mesurées au cours du séchage à l'étuve.</i>	86
<i>Figure 2.10 : Représentation schématique des productions et des consommations de bois sur le territoire bisontin au XVIIIème siècle, calculées à partir des AMB (crédit photo : carte postale du mont de Bregille : AMB CP-B-P16-0194 et carte de Besançon : AMB non côté)</i>	93
<i>Figure 3.1 : The forest of Chailluz on a LiDAR projection (data : Fruchart, 2014). Charcoal platforms are represented in red and yellow dots.</i>	106
<i>Figure 3.2 : The forest of Chailluz represented with current forest types (data : Office National des Forêts) and results of charcoal analysis on charcoal kilns.</i>	109
<i>Figure 3.3 : Radiocarbon dates of platforms on the calibrated curve. On the right : CPF analysis on radiocarbon dates.</i>	115
<i>Figure 3.4 : Magnetic susceptibility survey on platform CH29 and CH30. A : On surface. The topography was measured and represented on the left part. B : On profil.</i>	117
<i>Figure 3.5 : Hypothetical diagram of the disturbed soil and residual charcoal remains during the reuse of a platform for the charcoal production. A : with constant intensity of use. B : with variable intensity of use.</i>	119
<i>Figure 3.6 : Charcoal analysis on charcoal kiln platforms of Chailluz.....</i>	122
<i>Figure 4.1 : Carte de la forêt de CHailluz représentée par groupe de types de stations forestières actuelles (données : Office National des Forêts). Les plateformes de charbonnage qui ont été analysées par anthraco-analyse sont représentées (Dupin et al., 2017), ainsi que la localisation des inventaires botaniques réalisés pour la présente étude.</i>	139
<i>Figure 4.2 : Représentation schématique du modèle prédictif (Dufraisse, 2002, modifié).</i>	141
<i>Figure 4.3 : Représentation schématique de la mesure du diamètre d'un cylindre de bois carbonisé A, par l'utilisation de l'outil trigonométrique développé par Dufraisse and Garcia Martinez, 2011).</i>	143
<i>Figure 4.4 : Utilisation du modèle prédictif sur les bois sur pied des inventaires dendrométriques. Les volumes de bois sont représentés en vert, et les volumes décomposés sont en noir.</i>	147
<i>Figure 4.5 : Nombre de tige par hectare en fonction des classes de diamètres, par inventaire dendrométrique.</i>	148
<i>Figure 4.6 : Largeurs de cerne mesurées exprimées par référentiel.</i>	150

Figure 4.7 : Diamètres calculés à partir de la somme des largeurs de cerne mesurés pour chaque chemin de mesure, exprimés par référentiel.	151
Figure 4.8 : Diamètres calculés (x) de chaque largeur de cerne mesurée (y), par référentiel. Les courbes de tendance en bleu sont exprimées à 95% de confiance. La limite en dessous de laquelle le diamètre est estimé de « charbonnable » (7cm) est représenté en rouge sur l'axe des abscisses.	151
Figure 4.9 : Largeurs de cerne moyennes par classe de diamètre, exprimées par référentiel.	152
Figure 4.10 : Ds mesurés de chaque charbon, exprimé par taxon et par groupe de types de station. Les individus en rouge ont des diamètres estimés à partir de « mesures limites ».	153
Figure 4.11 : Utilisation du modèle prédictif sur les charbons des plateformes de Chailluz. Les volumes de charbon sont représentés en noir et les volumes recomposés de bois sont en vert. Les taxons identifiés sont représentés pour des diamètres inférieurs et supérieurs à 7cm.	154
Figure 4.12 : LC moyenne exprimée par taxon et par groupe de types de stations.	155
Figure 4.13 : Pourcentages de charbons de chêne identifiés comme étant de l'aubier, du duramen ou non définis, par groupe de types de stations.	156
Figure 4.14 : LC (mm) en fonction du diamètre (cm) par taxon. La courbe de tendance en bleu est exprimée à 95% de confiance. La limite en dessous de laquelle le diamètre est estimé de « charbonnable » (7cm) est représentée en rouge sur l'axe des abscisses. La couleur des points correspond aux groupes de types de stations définis en figure 4.1.	157
Figure 4.15 : LC moyenne par classe de diamètre, exprimées par groupe de types de stations à gauche, et par taxon à droite.	157
Figure 4.16 : LC en fonction du diamètre par taxon. Les couleurs des points et des courbes de tendance correspondent aux trois groupes de types de stations. Les courbes de tendance sont exprimées à 95% de confiance pour chaque groupe de types de stations. La limite en dessous de laquelle le diamètre est estimé de « charbonnable » (7cm) est représenté en rouge sur l'axe des abscisses.	159
Figure 4.17 : Représentations schématiques par groupe de types de stations des LC moyennes des charbons en fonction de leur diamètre.	159
Figure 4.18 : Pourcentages de charbons de chêne attribués à de l'aubier, du duramen ou indéterminés, exprimés par classe de diamètre.	160
Figure 4.19 : Pourcentages de charbons de chêne attribués à de l'aubier, du duramen ou indéterminés, exprimés par classe de diamètre et par groupe de types de stations.	161
Figure 4.20 : LC moyennes par classe de diamètre des charbons de chêne identifiés comme étant de l'aubier, du duramen ou non attribués.	162
Figure 4.21 : LC moyenne par classe de diamètre des charbons de chêne identifiés comme étant de l'aubier, du duramen ou non attribués, par groupe de types de stations.	163
Figure 4.22 : Pourcentages des anthraco-groupes identifiés totaux.	164
Figure 4.23 : Pourcentages des anthraco-groupes identifiés par groupe de types de stations.	164
Figure 4.24 : Confrontation des LC moyennes par diamètre des charbons archéologiques avec celles des référentiels. Les données en rouge sont les mesures archéologiques. Celles en bleu sont celles des référentiels. Les courbes de tendance sont exprimées à 95% de confiance.	169
Figure 5.1 : The forest of Chailluz on a LiDAR projection (Data: C. Fruchart, 2014). The charcoal platforms that underwent an anthracological analysis (blue dots) were also radiocarbon dated. The active reserve stand from 1721 to 1893 is represented in red.	188
Figure 5.2 : Profile of soil B of the CH29 charcoal platform. A: Micromorphological thin sections. The 4 fabric units interpreted by this analysis are represented here by the limits in red. Complexes A and B of fabric unit 1 are separated here by the blue limit. B: Raman thin sections noted from L1 to L5. Red circles delimit the measurement areas of the Raman analysis. Yellow circles locate the site of the fusinites and semi-fusinites for which reflectance was qualitatively evaluated.	190
Figure 5.3 : Magnetic susceptibility of the surface of CH29 (after Dupin et al., 2017)? PR.B is the site of the profile of soil B that underwent the micromorphological and Raman study.	191
Figure 5.4 : Elements observed under the microscope in the micromorphological thin sections. bv: biological voids / mc: microcharcoal / ba: burnt aggregates / A: Charring front in the fabric unit 1A / B: Structure of fabric unit 1B / C: Clay aggregate with several levels of rubefaction / D: Clay aggregates side by side with several different levels of rubefaction / E: More or less reddened radial chert / F: Structure of fabric unit 2 / G: Structure of fabric unit 4.	194
Figure 5.5 : All of the Raman spectrums obtained by thin section. Nomenclature: thin section 1 R1 analysis 1 = First analysis in the first measurement area of thin section L1. In order to enhance readability, the Raman spectrums by measurement area were represented in the same colour gradient.	197
Figure 5.6 : Graphic of the estimated temperatures according to the paleothermometer at HHT from 6h +/- 20°C, calculated by Deldicques et al. 2016. Error bar of 20°C.	198

<i>Figure 5.7 : Observation of fusinites with a reflected light microscope. A: Two nearby fusinites with different reflectance / B and C: Fusinites with a clearly visible cellular structure / D: More altered fusinite / E: Non-charred plant debris.....</i>	<i>199</i>
<i>Figure 6.1 : Frises chronologiques résumant les évènements importants du XVIIème au XXIXème siècle, à quatre échelles d'observation différentes. De haut en bas : à l'échelle de la forêt de Chailluz, à l'échelle de Besançon, à l'échelle de la Franche-Comté, et à la France. Les couleurs définissent cinq thèmes : le rose pour le charbonnage, le vert pour le bois en général, le jaune pour la métallurgie, et le bleu pour le bois de chauffage.</i>	<i>215</i>
<i>Figure 6.2 : Confrontation des descriptions des peuplements forestiers présents au cours du XVIIIème siècle.</i>	<i>224</i>
<i>Figure 6.3 : Visualisation du couvert forestier sur le territoire bisontin au cours du temps. Les cartes de fond sont le relevé LiDAR acquis par Catherine Fruchart (2014).....</i>	<i>227</i>
<i>Figure a.57 : La meule traditionnelle. A: Représentation schématique d'une meule vue en coupe verticale (Lepoivre, 1940). B: Photographie d'une meule en fonctionnement en forêt de Chaux (photo: A. Dupin)</i>	<i>236</i>
<i>Figure a.58 : Mise en évidence des événements lors de la carbonisation d'une meule traditionnelle (flèches noires) (photo: A. Dupin).</i>	<i>236</i>
<i>Figure a.59 : Représentation schématique de la propagation de la carbonisation au sein d'une meule traditionnelle (Lepoivre, 1940).</i>	<i>236</i>
<i>Figure a.60 : Mise en évidence des trois parties métalliques composant un four Magnein. A l'arrière-plan, un four Magnein est en fonctionnement (photo: A. Dupin).....</i>	<i>240</i>
<i>Figure a.61 : Mise en évidence des coude-événements et des coude-cheminées d'un four Magnein en fonctionnement (photo: A. Dupin).....</i>	<i>240</i>
<i>Figure a.62: Représentations schématiques d'un four Magnein. A: Vue en coupe verticale. B: Vue en coupe horizontale (Lepoivre, 1940).....</i>	<i>241</i>
<i>Figure a.63 : Mise en évidence des tirages d'air sur un four Magnein en fonctionnement (flèches noires) (photo: A. Dupin).....</i>	<i>241</i>

<i>Table 2.1 : Conversions utilisées dans les calculs de ce chapitre.....</i>	<i>57</i>
<i>Table 2.2 : Superficie du quart de réserve de la forêt de Chailluz, et de sa part exploitée au cours du temps. Les données sont issues de notre transcription des AMB concernées.</i>	<i>65</i>
<i>Table 2.3 : Quantités de bois produit par l'exploitation de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz, exprimées en corde de bois et en nombre de voitures transportant le bois. Les données sont issues de notre transcription des différentes AMB concernées.</i>	<i>68</i>
<i>Table 2.4 : Quantités de bois flotté et de bois produit par l'exploitation de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz, exprimées en corde de bois. Les données sont issues de la transcription de Dianin (1995) des AMB DD119 à DD129 et DD143.....</i>	<i>69</i>
<i>Table 2.5 : Vente de la charbonnette aux bisontins de 1881 à 1886. Les données sont issues de notre transcription de l'AMB 2N9.....</i>	<i>74</i>
<i>Table 2.6 : Estimation des pourcentages de masse sèche des incuits et des charbons de la charbonnière expérimentale, à partir des masses « humide » et masse « sèche » des incuits et charbons pris pour référence.</i>	<i>87</i>
<i>Table 2.7 : Rendements estimés dans différentes régions et utilisés comme comparaison avec le rendement calculé à partir de la charbonnière expérimentale du présent travail.</i>	<i>89</i>
<i>Table 2.8 : Consommation de bois et de charbon de bois par une usine métallurgique par an. En gras, les données brutes issues des différentes études.....</i>	<i>92</i>
<i>Table 3.1 : Radiocarbon dates (BP) of platforms of Chailluz.....</i>	<i>111</i>
<i>Table 3.2 : Botanical survey around platforms CH29 and CH30. Counting is expressed in presence/absence of a species present in the prospected area.....</i>	<i>123</i>
<i>Table 3.3 : Hellinger distance calculated between anthracological spectra of platforms. Colors correspond to the different forest types.....</i>	<i>123</i>
<i>Table 4.1 : Caractérisations de chaque référentiel (diamètre, LC, MLC). Les données en bleu sont des critères discriminants par rapport aux autres référentiels ou par rapport à un référentiel en particulier (lignes en pointillés). NR= non renseigné.</i>	<i>165</i>
<i>Table 5.1 : Data on the charcoal platforms with several charcoal levels separated by sterile levels.</i>	<i>186</i>
<i>Table 5.2 : Detailed micromorphological description of the profile of soil B of platform CH29. *according to solid components.....</i>	<i>195</i>
<i>Table 5.3 : Table representing the estimated temperatures according to the paleothermometer at $HTT \geq 6h$, after Deldicque et al., 2016 (« estimated temperature » column).</i>	<i>198</i>

Il parait que de tous temps on a senti l'importance de la conservation des forêts ; elles ont toujours été regardées comme le bien propre de l'état, et administrées en son nom : la religion même avait consacré les bois, sans-doute pour défendre, par la vénération, ce qui devait être conservé pour l'utilité publique. Nos chênes ne rendent plus d'oracles, et nous ne leur demandons plus le gui sacré ; il faut remplacer ce culte par l'attention ; et quelque avantage qu'on ait autrefois trouvé dans le respect qu'on avait pour les forêts, on doit attendre encore plus de succès de la vigilance et de l'économie.
Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751)

La forêt est une ressource qui nécessite protection. **Diderot et d'Alembert (op. cit.)** en ont déjà conscience dans leur Encyclopédie. Leur définition de la forêt, au-delà de toute autre considération, est par ailleurs plus vague :

« On entend en général par ce mot, un bois qui embrasse une fort grande étendue de terrain : cependant cette dénomination n'est pas toujours déterminée par la plus grande étendue. On appelle forêt dans un lieu, un bois moins considérable que celui qui ne porterait ailleurs que le nom de buisson ».

De nos jours la manière d'appréhender la forêt varie considérablement en fonction des points de vue. Définir ce qu'est l'espace forestier n'est pas forcément chose facile et le sujet a souvent prêté à diverses controverses. Aujourd'hui, on peut par exemple définir la forêt selon son taux de boisement et la hauteur des arbres présents sur cet espace. L'institut Géographique National (IGN) et, plus largement à l'échelle internationale, la Food and Agriculture Organisation (FAO) utilisent la définition suivante :

« un territoire occupant une superficie d'au moins 50 ares avec des arbres capables d'atteindre une hauteur supérieure à cinq mètres à maturité *in situ*, un couvert arboré de plus de 10 % et une largeur moyenne d'au moins 20 mètres. Les sites momentanément déboisés ou en régénération sont classés comme forêt même si leur couvert est inférieur à 10 % au moment de l'inventaire. La forêt n'inclut pas les terrains dont l'utilisation du sol prédominante est agricole ou urbaine. » (www.inventaire-forestier.ign.fr).

En complément de cette définition, **Léonard (2003, 1999)**, ancien ingénieur des Eaux et Forêt, a défini la forêt selon quatre points de vue. D'après lui, les naturalistes s'intéressent à la forêt dans un but phytosociologique et écologique. Les économistes, sociologues et géographes utilisent les statistiques descriptives pour juger du potentiel marchand de la forêt, des aspects patrimoniaux ou encore pour étudier sa gestion par les sociétés humaines. Les gestionnaires de la forêt l'étudient dans l'optique d'optimiser son exploitation, du régime sylvicole à adopter aux essences à privilégier. Enfin, pour les citoyens, la forêt est avant tout un espace de loisirs et de liberté avant d'être une ressource économique.

Le même auteur a également défini la forêt selon ses différents usages, mettant ainsi en évidence qu'elle était et qu'elle est toujours fortement sollicitée par l'Homme. Les « forêts de subsistance » sont exploitées comme sources alimentaires, que ce soit pour l'Homme ou que ce soit pour le bétail. Le pacage, qui consiste à laisser paître le bétail en milieu sylvicole, et la culture sur brûlis sont des exemples d'usage de ce type de forêt. Les « forêts industrielles » étaient utilisées du XVI^{ème} au XIX^{ème} siècle exclusivement par l'industrie et la proto-industrie pour répondre aux besoins combustibles, que ce soit sous forme de bois ou de charbon de bois. L'industrie la plus demandeuse était alors la métallurgie. Enfin, les « futaies en coupe réglée » ont pour but essentiel la production de bois d'œuvre.

Cette nécessité au cours du temps de définir différents types de forêts de production prouve que l'Homme a interagi avec la forêt pour la modéliser en fonction de ses besoins. Plus particulièrement, il a influencé la structuration de la végétation en adoptant une gestion de la forêt qui puisse répondre au mieux à la demande (**Bond et al., 2005; Bowman et al., 2011**).

Au XVIII^{ème} siècle, les termes de « taillis », « gaulis » et « futaye » servaient uniquement à différencier les arbres selon leur âge (**Diderot and D'Alembert, 1751**). Le taillis regroupait alors tous les arbres de la première pousse jusqu'à 25 ans d'âge, et le gaulis, les arbres de 25 à 50 ou 60 ans. La « jeune-futaye », ou « demi-futaye » regroupait les arbres de 50-60 ans à 90 ans et la « haute-futaye » était âgée de plus de 90 ans.

De nos jours, et c'est peut-être la preuve d'une gestion plus évoluée et plus raisonnée qu'à l'époque, les termes de « taillis » et « futaie » sont employés pour différencier les arbres selon leur âge, mais pas seulement. Ils se sont également précisés pour définir l'origine des arbres du peuplement, et la structure forestière, ainsi que pour décrire le régime sylvicole adopté pour la conservation et la mise en valeur des forêts soumises (Delpech et al., 1985). Le vocabulaire forestier s'est donc enrichi avec la volonté d'une gestion raisonnée de la forêt.

Ainsi, la futaie définit un peuplement forestier composé d'arbres issus de semis ou de plants (franc-pied) et le taillis, ou la cépée, est apparenté à un peuplement composé d'arbres issus de rejets (www.inventaire-forestier.ign.fr).

A l'échelle de la structure forestière, les termes futaie régulière et irrégulière sont associés au taux de couverture du taillis et de la futaie ainsi qu'à la distribution verticale de la futaie. On appelle alors futaie régulière toute forêt dont le taux de recouvert du taillis est inférieur à 25% et où la hauteur de l'étage supérieur est égal ou supérieur au 2/3 dans la futaie. La futaie irrégulière a le même taux de recouvert du taillis que la futaie régulière, mais la hauteur de l'étage supérieur est inférieur au 2/3 dans la futaie. Le mélange de futaie et de taillis est défini par des proportions égales ou supérieures à 25% chacun. Enfin, la structure forestière en taillis est caractérisée par un taux de recouvert relatif de la futaie inférieur à 25% (www.inventaire-forestier.ign.fr).

A l'échelle du régime sylvicole adopté, les termes employés sont définis selon l'âge et les dimensions des arbres qui résultent finalement de la révolution des coupes ainsi que de l'origine de l'arbre.

La futaie régulière est ainsi constituée d'un peuplement de futaie auquel est appliqué un traitement régulier, c'est-à-dire que les coupes des arbres sont réalisées en même temps, aboutissant à une structure équiennne et de dimensions similaires. Dans la futaie irrégulière, les coupes sont hétérogènes dans le temps, donnant des arbres de dimensions et d'âges différents. Les arbres en futaie produisent du bois d'œuvre de qualité, mais l'inconvénient majeur d'une futaie est son besoin d'entretien régulier afin de produire un maximum de bois de qualité en un minimum de temps. L'entretien d'une futaie productive est assuré par des éclaircissements pour dégager les semis sélectionnés (arbres d'avenir) (Institut pour le développement forestier, 1980).

Les taillis simples sont composés de peuplements de taillis gérés en régime régulier, alors que les taillis furetés sont sous régime irrégulier. L'avantage d'une population en taillis est très certainement le peu d'entretien et de moyen nécessaire. Par ailleurs, ce type de peuplement entraîne un épuisement significatif du sol en minéraux nutritifs, et, depuis l'apparition du foyer à fioul dans les années 1960 il est économiquement peu rentable, puisqu'il était essentiellement utilisé comme bois de chauffage (Institut pour le développement forestier, 1980). Toutefois, le peuplement est maintenu en raison des bienfaits sur le gibier et il est amélioré pour le rendre plus rémunérateur. Dans ce cas, l'amélioration consiste en un éclaircissement du taillis permettant à des baliveaux (jeunes arbres sélectionnés et non coupés) de devenir des arbres de futaie qui pourront être destinés à la production de bois d'œuvre.

Le taillis-sous-futaie (TSF) est caractérisé par la présence d'arbres de rejets soumis au régime régulier et d'arbres de franc-pied en régime irrégulier. Autrefois, ce type de peuplement était apprécié puisqu'il fournissait du bois de feu et du bois d'œuvre (Institut pour le développement forestier, 1980). Dorénavant, il est bien souvent amélioré puisque le taillis a peu de valeur économique et les bois de futaie sont de moins bonne qualité que s'il s'agissait

de futaie seule. Les semis naturels et les baliveaux sont donc éclaircis par coupe régulière des taillis avoisinant et concurrençant les brins d'avenir.

Ainsi, le régime sylvicole adopté était en majeure partie choisi selon les besoins de l'époque, aboutissant à une restructuration des peuplements forestiers, et révélant *a fortiori*, un impact certain de ces besoins humains sur la forêt.

Evolution du couvert forestier et des impacts anthropiques au cours de l'Holocène en Franche-Comté

L'évolution forestière des dix derniers millénaires jusqu'à l'Antiquité dans le nord-est de la France a été caractérisée par des études paléo-environnementales (Gauthier, 2004; Gauthier and Richard, 2008; Magny, 1995). Ces analyses ont permis de démontrer que durant la première moitié de l'Holocène, le facteur climatique était principalement responsable de l'évolution du couvert forestier. Ainsi, le réchauffement climatique du début de l'Holocène a favorisé le développement du pin, du bouleau, du noisetier puis des essences de la chênaie mixte jusque sur le deuxième plateau du Jura. La deuxième moitié de l'Holocène, marquée par le refroidissement du Néoglaciel, soit à partir des périodes du Néolithique moyen et final, correspond au développement d'espèces plus liées au froid et à l'humidité. Ainsi le hêtre, le sapin et l'épicéa colonisèrent les versants de la montagne jurassienne. Au cours de cette période, la sédentarisation de l'Homme entraîna une sollicitation particulière de la ressource ligneuse pour la construction en dur des habitats, pour le chauffage, puis pour l'exploitation des minerais à partir de la Protohistoire. L'expansion des activités agropastorales participa bien sûr à cette diminution progressive du couvert forestier au profit des aires cultivées.

Le dernier arbre qui s'implanta naturellement dans nos flores fut le charme à partir du début de l'âge du Fer. Les romains, et peut-être avant eux les gaulois, importèrent le noyer, le châtaignier et autres fruitiers. Il existe finalement peu de textes mentionnant la forêt de l'Antiquité. Toutefois, on peut citer Harris (2011) qui a décrit les usages du bois dans le bassin méditerranéen, en notifiant que le bois était utilisé pour le bois d'œuvre, mais également à l'état de charbon de bois pour la métallurgie. Catherine Fruchart (2014) a transcrit quelques passages de textes antiques, notamment ceux de Caton, Palladius, Plin l'Ancien et Columelle. De sa transcription, on apprend que la forêt gallo-romaine faisait partie du domaine rural, et que son profit semblait bien moindre que la vigne ou encore la production céréalière. On y pratiquait la pâture en sous-bois où les arbres tels que le hêtre et le chêne nourrissaient principalement les porcs. Par ailleurs, les techniques sylvicoles semblaient être maîtrisées, alliant les contraintes naturelles aux actions anthropiques pour orienter la croissance des arbres. La fin de l'Antiquité fut parfois marquée par une augmentation de la couverture forestière, qui fut induite par les facteurs climatique et anthropique. La baisse des températures et l'augmentation de la pluviométrie à cette période ont favorisé le développement forestier. Tout comme la baisse démographique induisit la déprise agricole qui s'est traduite par la recolonisation par les espèces ligneuses des territoires anciennement cultivés. Chalvet (2011) a mis en évidence la présence d'un système agro-sylvo-pastoral dès le VI^{ème} siècle au moins dans le Nord de la Gaule, avec la pratique de l'essartage. Cette pratique consiste à couper le bois et les broussailles d'un terrain destiné à être cultivé et d'y répandre les cendres du bois carbonisé dans le but d'enrichir le sol avant la culture. Le terrain est ensuite laissé au repos pour laisser le bois et les broussailles repousser. La Lex Burgundionum, qui est un recueil de lois probablement écrit par Gondebaud, décrit l'utilisation de la forêt à la fin du V^{ème} siècle. D'après la transcription de ce texte par Peyré (1855) et cité par Catherine Fruchart (2014), la forêt était sollicitée avec des règles de

préservation qui servaient plus l'intérêt de l'Homme que celui du développement forestier. La forêt communale apparaît comme un espace qu'on pouvait s'approprier par le défrichement, à la condition qu'un terrain forestier soit rendu au copropriétaire de même surface que le terrain exploité. De même, il semblerait que les coupes de bois étaient autorisées sur des parcelles privées, à l'exception des arbres fruitiers.

De nos jours (www.inventaire-forestier.ign.fr), les régions traditionnellement forestières (nord-est, massif landais) ont le taux d'accroissement forestier le plus bas au niveau national. C'est le cas de la Franche-Comté, avec un taux d'accroissement de moins de 0.3%/an. Toutefois, le taux de boisement de cette région est bien supérieur à la moyenne nationale (29%), avec 44% de surface forestière derrière la Corse et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Le département du Jura fait même partie des dix départements les plus boisés de France avec un taux de 46%. En plus d'être particulièrement boisée, la Franche-Comté possède 98% de forêts fermées, c'est-à-dire présentant une couverture boisée d'au moins 40%.

Dans l'actuelle région Bourgogne-Franche-Comté, de 50 à 75% des forêts sont privées, alors que 53% sont des forêts publiques essentiellement communales. 11% d'entre elles sont des forêts domaniales. D'ailleurs, la forêt domaniale de Chaux, dans le département du Jura, forment avec les forêts communales attenantes le second plus grand massif forestier national. D'un point de vue taxonomique les feuillus représentent 62% du peuplement forestier franc-comtois, avec la prédominance du hêtre et du chêne rouvre, suivi du chêne pédonculé, du charme et du frêne. Les conifères sont représentés essentiellement par l'épicéa commun, suivi du sapin pectiné. Dans le département du Doubs, les peuplements de feuillus se situent essentiellement en plaine et en moyenne altitude.

La forêt de Chailluz, forêt franc-comtoise

A partir du Moyen Âge, arrive le temps « d'une mise en valeur systématique de la forêt, qui fit la prospérité des bûcherons et des éleveurs » (Duby, 1973). Les recherches menées sur la forêt de Chailluz (forêt de Besançon, Franche-Comté) montrent l'évolution des pratiques au sein de cet espace boisé au cours du temps (Fruchart, 2014). En forêt de Chailluz la période romaine était caractérisée par un usage agropastoral des terres à l'ouest de la forêt et la période antique était caractérisée par la culture céréalière et de légumineuses.

Les données concernant le Premier Moyen-Âge font défaut. Toutefois, les données palynologiques (Gauthier and Richard, 2008 pour la Franche-Comté) permettent de suggérer que la forêt était probablement plus étendue qu'à l'Antiquité, et certainement plus étendue qu'aujourd'hui. A la période médiévale, la forêt est autant utilisée à des fins de subsistance que pour le bois d'œuvre et comme source de combustible. Plus particulièrement, jusqu'au XIII^{ème} siècle, elle était utilisée sur une courte période pour l'essartage, c'est-à-dire pour la production céréalière (Bechmann, 1984; Corvol, 1987; Léonard, 2004). Cette activité semble d'ailleurs avoir été repérée dans la partie centre-ouest de la forêt de Chailluz, avec la présence de surfaces à vocation agro-pastorale supposées permanentes (Fruchart, 2014). C'est seulement à partir du XIII^{ème} siècle que l'essartage et le traitement sylvicole se firent sur sols séparés. Par ailleurs, à Besançon, au second Moyen-Âge, le vin produit avait une renommée nationale certaine, faisant de cette activité la production la plus florissante de la ville (Fiétier, 1973). Les vignes étaient alors localisées au moins au-delà de la ligne de crête de la forêt de Chailluz (Fruchart, 2014).

Le petit âge glaciaire du Moyen-Âge (hivers plus rigoureux et étés plus courts) marqua le début du XV^{ème} siècle et ce jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, entraînant une augmentation

des besoins en bois de chauffage, sollicitant davantage les forêts. Ce facteur, ajouté au développement de l'industrie a eu pour conséquence un état critique de la forêt française, aboutissant au « minimum forestier » du milieu du XIX^{ème} siècle. A l'échelle de Besançon, la forêt fut encore plus mise à mal en raison de nombreuses constructions qui furent débutées ou terminées durant l'époque moderne. L'interdiction de couper du bois en forêt de Chailluz à partir de 1470 et ce pendant 20 ans, semble confirmer cette pénurie de bois qui sévissait dans la région (Fruchart, 2014). D'ailleurs, durant le XVI^{ème} siècle Besançon limite les droits d'usage en forêt de Chailluz, ce qui entraîna de multiples contestations puisque cette forêt était sollicitée pour de nombreuses utilisations (Muller, 1999). Elle était exploitée pour le bois de chauffage, pour le bois de construction, mais aussi pour nourrir les animaux d'élevage et pour les matières premières des artisans du bois, à savoir, le bois, la pierre et la chaux. Au XVI^{ème}-XVII^{ème} siècles les vigneronns semblaient être toutefois les principaux utilisateurs de la forêt de Chailluz. Les essences de bois prélevées préférentiellement étaient alors le chêne, le hêtre puis le charme et le cerisier, et ensuite le pommier, le poirier, le frêne et le tilleul (Fruchart, 2014).

Dès 1528, un système de cantonnement a été établi en forêt de Chailluz qui fut divisée en quatre quarts (Fruchart, 2014). L'idée était d'exploiter le taillis pour le chauffage de la ville en préservant les arbres fruitiers. Mais c'est au début du XVII^{ème} siècle que l'Homme prit réellement conscience de l'impact qu'il avait sur la forêt et de l'urgence d'agir contre le vieillissement et la diminution considérable du couvert forestier. Louis XIV, alors roi de France, fit rédiger par Colbert un nouveau règlement des Eaux et Forêts, dans le but de restaurer le couvert arboré. L'ordonnance de Colbert fut publiée en août 1669 (Corvol et al., 1984). Cette ordonnance prévoyait que la Maîtrise des Eaux et Forêts devait faire respecter le nouveau règlement et devait s'occuper de la gestion de la forêt. En Franche-Comté, la Grande Maîtrise des Eaux et Forêt fut créée en 1692. Le second aspect de cette ordonnance consistait en l'apposition d'un espace mis en réserve au sein de chaque forêt, où le bois devait être géré en haute futaie pour la production de bois de gros diamètre. Cet espace, appelé « quart de réserve », pouvait être exploité par coupes dites « extraordinaires » afin de fournir le bois nécessaire à la construction de bâtiments, mais seulement en cas de grande nécessité (Corvol et al., 1984). La localisation de ce quart de réserve était plus souvent choisie pour son emplacement géographique, le plus facilement défendable possible contre les usagers, que pour son potentiel sylvicole. Les trois-quarts restants des forêts mises en régie étaient divisés en 25 à 30 parcelles égales exploitées par rotation de coupes dites « ordinaires » appelées assiettes. Cette rotation des coupes permettaient alors de laisser le temps au bois de se régénérer en espaçant deux coupes d'une même parcelle d'autant d'années qu'il y avait de parcelles. Cet espace était bien souvent un taillis-sous-futaie, exploité pour le bois de chauffage (Fruchart, 2014).

L'application de l'ordonnance de Colbert ne fut pas immédiate. Elle fut progressivement adoptée sur près d'un siècle dans certaines régions françaises. D'ailleurs, de 1705 à 1721, l'exploitation de la forêt de Chailluz n'obéissait toujours à aucune planification. C'est seulement en 1721 ou 1722 qu'elle fut découpée en 30 parcelles égales et un quart de réserve (Fruchart, 2014). Trois ans plus tard, en 1724, la première coupe annuelle de l'assiette de Chailluz fut entreprise. Toutefois, les bienfaits de cette nouvelle gestion de l'espace forestier ne semblaient pas immédiats. En effet, le bois produit de l'assiette de la forêt de Chailluz pouvait jusqu'en 1730, être transformé en charbon de bois, mais à la condition qu'il soit vendu aux bisontins. Par ailleurs, en 1738 la fabrication de charbon y était contrainte et en 1763 elle y était complètement interdite. Ces restrictions semblent alors démontrer des besoins plus élevés que ce que l'assiette de la forêt pouvait fournir. L'arrivée d'une nouvelle

garnison à Besançon au début du XVIII^{ème} siècle a très certainement joué sur ces besoins en bois. D'ailleurs, la première et la seconde exploitation du quart de réserve de la forêt de Chailluz ont été programmées pour la construction de nouveaux bâtiments militaires. Toutefois, le développement industriel qui marqua la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, entraîna une augmentation démographique à Besançon, et par conséquent a très bien pu être une des causes de la forte demande de bois, que ce soit de bois de construction ou de bois de chauffage. D'ailleurs, les parcelles de vignes furent converties au profit de l'habitat à cette période (Chevalier and Scherrer, 1955). Toutefois, cette déprise rapide de la viticulture à Besançon fut également causée par la hausse du prix du vin (Royer et al., 1988).

Le charbonnage en Franche-Comté

Histoire du charbonnage

Jusqu'à la Révolution industrielle, voire jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle, le charbon de bois était une ressource combustible fortement utilisée en contexte domestique (cuisine et chauffage : Deforce and Haneca, 2015; Namaalwa et al., 2009; Syred et al., 2006), pour l'artisanat et pour l'industrie métallurgique (Belhoste, 1990; Braudel, 1979; Husson, 1995; Woronoff, 1994, 1990). En effet, son pouvoir calorifique étant supérieur à celui du bois, le charbon de bois permettait d'atteindre le point de fusion du fer à 1200^{°C} (Mangin, 2004; Woronoff, 1990, 1984). La découverte des gisements de minerai de fer entraîna ainsi la construction d'usines métallurgiques à proximité des forêts et permit l'essor de la fabrication du charbon de bois (Lepoivre, 1940). Des places à charbon ont ainsi été attestées dès le Moyen-Age et jusqu'au XIX^{ème} siècle, voire XX^{ème} siècle (Bonhôte and Vernet, 1988; Bouchev, 1969; Davasse, 2000; Malepeyre, 1836).

Avec le développement de la distillation du charbon de terre pour le travail du fer à partir des années 1780-1790, le charbon de bois se voit confiné au chauffage et à la cuisine, pour lesquels il fût remplacé par le gaz d'éclairage (gaz de houille et gaz butane) dans les années 1800-1820 (Lepoivre, 1940; Woronoff, 1984). C'est finalement la découverte de l'électricité dans les années 1880, et la généralisation du charbon de terre à partir de 1860 pour les centrales thermiques, la sidérurgie et pour le chauffage domestique, qui sonnèrent le glas du charbon de bois (Lepoivre, 1940; Rouaud, 2013).

Par ailleurs, bien qu'actuellement utilisé uniquement pour le chauffage en milieu rural, en raison du développement de nouvelles ressources fossiles tel que le pétrole à partir de l'entre-guerres (Rouaud, 2013), le charbon de bois est à nouveau recherché dans différents milieux industriels. Sa grande pureté fait qu'il est à nouveau sollicité en métallurgie pour la préparation d'alliages spéciaux. De même, sa porosité le rendant apte à absorber d'importantes quantités de gaz et de liquides, le charbon de bois est utilisé pour le filtrage de l'eau, la conception de produits pharmaceutiques, ou encore en tant que charbon « actif » dans les masques à gaz (Lepoivre, 1940).

Procédés utilisés pour la fabrication du charbon de bois

La fabrication du charbon de bois est une pratique qui demande un grand savoir-faire et repose essentiellement sur le jeu entre les différentes entrées d'air. En effet, la carbonisation à combustion partielle du bois pour la fabrication du charbon s'effectue en deux temps (Schenkel et al., 1997). Dans un premier temps, le séchage et la carbonisation du bois sont engendrés par l'énergie libérée par la combustion des gaz et l'évaporation de l'eau

contenue dans le bois. En stoppant l'entrée d'air à ce moment-là de la combustion, le charbonnier obtiendra le charbon qu'il en attendait. En revanche, s'il ne stoppe pas les entrées d'air, la braise se consumera complètement, devenant de la cendre et dégageant du gaz carbonique et de la vapeur d'eau (Antal and Gronli, 2003; Lepoivre, 1940; Schenkel et al., 1997; Strezov et al., 2007; Théry et al., 2010). Sans une bonne maîtrise de la pratique, la carbonisation du bois peut donc soit être hétérogène au sein de la meule voire pire, mener à l'embrasement de la meule, ou soit mener à la combustion complète des charbons. Quel que soit le type de meule utilisé, le charbonnier se réfère donc à la couleur et à la densité des fumées dégagées et à l'affaissement de la meule, pour estimer la propagation du front de carbonisation et définir ainsi quand il est nécessaire de fermer ou d'ouvrir les entrées d'air. Ce procédé de fabrication des charbons de bois est d'autant plus complexe à maîtriser lorsqu'il s'agit de produire du charbon de qualité. En effet, il est important de stopper la carbonisation à des températures avoisinant les 400-450°C pour que les gaz produits soient réabsorbés au charbon, induisant une augmentation du pouvoir calorifique du produit (Lepoivre, 1940). De même, une carbonisation lente du bois produit moins de gaz et plus de charbon et de pyrolygneux qu'une carbonisation rapide. C'est pourquoi, la conduite d'une meule à charbon peut, et doit, être menée sur plusieurs jours, voire semaines selon la taille de la charbonnière.

Pour mener à bien ce procédé, il existe trois types de dispositifs. Le premier, en fosse, était grandement usité à l'âge du fer notamment (Mangin, 2004). Le second type est la meule charbonnière. Selon les régions du monde elle se décline en trois variantes : la meule verticale traditionnelle qui est la plus répandue en Europe, la meule horizontale qui est utilisée en Zambie par exemple (Foley, 1986; Lusadis, 1989; Quivy, 1992; Schenkel, 1991), et la meule améliorée, qui est une variante de la meule verticale traditionnelle où la cheminée est modifiée pour l'accélération de la carbonisation et pour faciliter le procédé, répandue en Somalie notamment (Briane and Doat, 1985; FAO, 1984; Foley, 1986). Enfin, le troisième et dernier type de dispositifs pour la fabrication du charbon de bois est le four métallique, qui se développa à l'entre-deux guerres. Il supplanta la meule traditionnelle dans nos régions durant l'occupation allemande où la demande en charbon de bois était croissante, en raison de la pénurie de charbon de terre et de pétrole (Lepoivre, 1940; Lepoivre and Septembre, 1941). Ce dispositif était effectivement plus simple à mettre en place et plus rapide à utiliser que la traditionnelle meule.

En Franche-Comté, le charbonnage était mené en meule verticale traditionnelle, puis en four métallique de type Magnein (communication personnelle, baragues du 14). La place à charbon était choisie au plus près des cordes de bois utilisées, dans un endroit surélevé pour éviter la stagnation des pluies sur le faulde (place à charbon). L'emplacement était choisi de préférence sur une place unie ou à des endroits déjà utilisés antérieurement pour la fabrication du charbon (Malepeyre, 1836). Lepoivre (1940) précise même que la place était choisie « pour que l'on puisse carboniser 5 à 6 fois de suite avec du bois pris dans un rayon de 50 à 60 mètres ». Rouaud (2013) a également obtenu ce constat de la réutilisation des plateformes de charbonnage, en interviewant un ancien charbonnier entre le Lot et la Corrèze : « Durant toute la saison c'est la même plateforme qui fonctionne, bien qu'il y en ait d'autres autour ayant servi ultérieurement ». Quant aux dimensions de l'aire de faulde, elles devaient être de 8 enjambées de diamètre, soit environ 6 mètres, pour que le charbonnier puisse tourner autour de la charbonnière (Malepeyre, 1836). De plus, dès l'adoption de l'ordonnance de Colbert, les places à charbon devaient être marquées par les officiers des Eaux et Forêts.

Le fonctionnement de la meule traditionnelle et celui du four métallique en Franche-Comté sont décrits en **annexe 1 et 2**.

Le charbonnage et l'archéologie

D'un point de vue archéologique, le charbonnage est difficilement remarquable. Compte tenu du fait que les charbonniers étaient bien souvent issus de l'immigration italienne et résidaient en forêt, ils n'étaient pas scrupuleusement recensés comme l'habitant lambda d'un village ou d'une ville pouvait l'être (Bouchev, 1969). De même, le charbonnage était une pratique d'été la plupart du temps en complément d'un premier métier du bois, tel que le bûcheronnage. Dans ces conditions, il est difficile de retrouver la trace des charbonniers sur les listes électorales ou les recensements de la période étudiée. Les procédés employés pour la pratique étant une connaissance bien gardée, ils nous sont connus que par des témoignages d'anciens charbonniers ou de leurs enfants. Sur le terrain, les indices de l'activité charbonnière sont tout aussi ténus. Le charbonnier utilisait essentiellement des perches de bois et de la mousse pour la construction du baccu (hutte du charbonnier en été). Ces matières premières étant périssables, il est rare de retrouver cette construction sur le terrain. Ainsi, le seul vestige archéologique éloquent de la pratique de charbonnage en meule traditionnelle est la place où le charbonnier construisait ses meules à charbon.

En France, l'intérêt porté aux plateformes de charbonnage pour l'étude de cette pratique ancienne a été initié dans les Pyrénées aux débuts des années 1990 (Davasse, 2000, 1992; Jalut and Metallie, 1991), puis dans le bas Languedoc (Fabre, 1996; Fabre and Gervet, 1992). Plus récemment, l'étude des forêts « métallurgiques » s'est développée dans le Massif Central et dans les Pyrénées catalanes (Allée et al., 2010; Euba-Rementeria, 2009; Euba-Rementeria and Allée, 2009; Paradis-Grenouillet et al., 2009; Pèlachs, 2005; Rouaud and Allée, 2013), avec la publication d'au moins deux thèses de doctorat (Paradis-Grenouillet, 2012; Rouaud, 2013). Par ailleurs, les études archéologiques sur le charbonnage dans les Vosges et en Forêt-Noire (Ludemann, 2010, 2003, 2002), ainsi qu'en Belgique, en forêt wallonne (Hardy et al., 2016; Hardy and Dufey, 2015, 2012a, 2012b), sont celles qui se rapprochent géographiquement le plus de la Franche-Comté.

Problématiques et plan de thèse

Etudier une forêt d'un point de vue archéologique ou historique revient donc à déceler l'impact que l'Homme a eu sur ce milieu, et la gestion qu'il en a eu. En région Franche-Comté, et plus particulière sur le territoire de Besançon, une étude a déjà été menée sur la forêt de Chailluz, dans le but de caractériser le potentiel archéologique de cette forêt, en déterminant les différentes occupations du site (cf. supra). Pour répondre à cet objectif, Catherine Fruchart (2014) a réalisé une analyse textuelle et planimétrique approfondie ainsi qu'une prospection LiDAR sur le massif de Chailluz. La prospection LiDAR permet de relever la topographie du sol à haute précision, et ce même sous couvert forestier. Grâce à cette technologie, un millier de plateformes de charbonnage a pu être identifié dans le seul massif de Chailluz, dont la majeure partie à l'emplacement du quart de réserve (figure i.1). La datation radiocarbone de 25 de ces places à charbon a défini le charbonnage entre la moitié du XVII^{ème} siècle et nos jours. Là où ces plateformes ont pu surprendre c'est qu'aucun texte étudié ne faisait mention de la pratique de charbonnage de manière intensive dans cette forêt au cours des siècles concernés. Les études les plus récentes ayant traité quelques archives concernant la forêt de Chailluz font plutôt la description d'un espace utilisé pour son bois de chauffage, ou son bois d'œuvre (Dianin, 1995; Muller, 1999; Vion-Delphin, 1991, 1971). Le charbonnage y est décrit de manière épisodique, et plutôt présenté sous forme de voie de fait. De plus, l'intervalle de temps, défini par la datation radiocarbone, sur lequel le charbonnage

était actif est trop important pour justifier la présence de plateformes dans le bois réservé de Chailluz.

Les objectifs de cette thèse étaient donc de caractériser la gestion forestière de Chailluz au moment du charbonnage, de caractériser comment la structure forestière a pu être modifiée par cette pratique et à quel point le reste des productions de bois a pu être impacté. Plus généralement, l'objectif était de déterminer le rôle que le charbonnage a pu jouer dans la diminution du couvert forestier qui sévissait en Franche-Comté depuis le début du XV^{ème} siècle et qui a mené au minimum forestier du XIX^{ème} siècle.

Pour répondre à ces objectifs, il fut nécessaire dans un premier temps de déterminer la destination du charbon de bois produit à Chailluz et déterminer la place que cette production avait au sein des autres utilisations du bois. Pour ce faire, une analyse non exhaustive des archives municipales de Besançon a été menée et présentée dans le second chapitre de ce manuscrit. Cette analyse a permis d'une part de quantifier le bois sortant de la forêt de Chailluz au XVIII^{ème} siècle. Puis, par déduction de données chiffrées sur le bois de chauffage et sur la métallurgie franc-comtoise, la recherche archivistique a permis de définir la destination du charbon de bois durant ce siècle, et d'avoir une idée de l'ampleur que cette production a eu sur la production de bois globale issu de ce site d'étude.

Dans un second temps, l'objectif était d'identifier les informations susceptibles d'être utilisées pour caractériser le charbonnage en forêt de Chailluz à partir de l'étude des plateformes de ce site. L'analyse archéométrique de ces plateformes a permis de définir les pratiques utilisées pour la fabrication de charbon de bois et de restituer le peuplement ligneux présent au moment du charbonnage. Le troisième chapitre, présenté sous la forme d'un article, détaille ainsi l'identification taxonomique réalisée sur les charbons de bois issus des plateformes et a ainsi permis de mettre en évidence le métissage d'essence des bois utilisés. Cette conclusion a donné accès à l'image de la végétation présente au moment de la pratique.

Le quatrième chapitre, présenté sous la forme d'un article en préparation, traite des calibres de bois utilisés pour le charbonnage, déterminés par analyse dendro-anthracologique des restes de charbon des plateformes de la forêt de Chailluz. Ce chapitre permet également par analyse dendrométrique de peuplements de référence, de conclure sur la structure du peuplement forestier présent au moment du charbonnage, et sur son exploitation par les acteurs de la pratique.

Le troisième article, définissant le cinquième chapitre de ce manuscrit, présente deux méthodes, assez novatrices en contexte archéologique sur des plateformes de charbonnage, qui ont été utilisées sur le profil de sol d'une des plateformes de la forêt de Chailluz. Cette étude a permis d'identifier des indices de réutilisation de la plateforme qui était déjà décrite dans les textes mais pas encore avérée sur ce type de profil de sol, et a ainsi permis de caractériser l'intensité de la pratique de charbonnage dans cette forêt.

Enfin, le sixième et dernier chapitre est la confrontation des résultats issus des sources historiques avec les résultats de l'approche archéométrique. Ce travail de synthèse replace le charbonnage en forêt de Chailluz au sein de la gestion globale de ce site, et plus précisément, permet de caractériser l'impact de la pratique sur la gestion forestière choisie par les contemporains pour répondre aux besoins engendrés par les différents usages de la forêt. De même, cette confrontation des données permet de préciser la datation des plateformes de charbonnage faite au cours du travail de Catherine Fruchart, permettant notamment de

justifier la présence de plateformes dans le quart de réserve. A l'échelle de la cité, ce chapitre permet de définir les réponses des instances de la ville à la disette du bois qui sévissait durant les XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles pour des raisons multifactorielles.

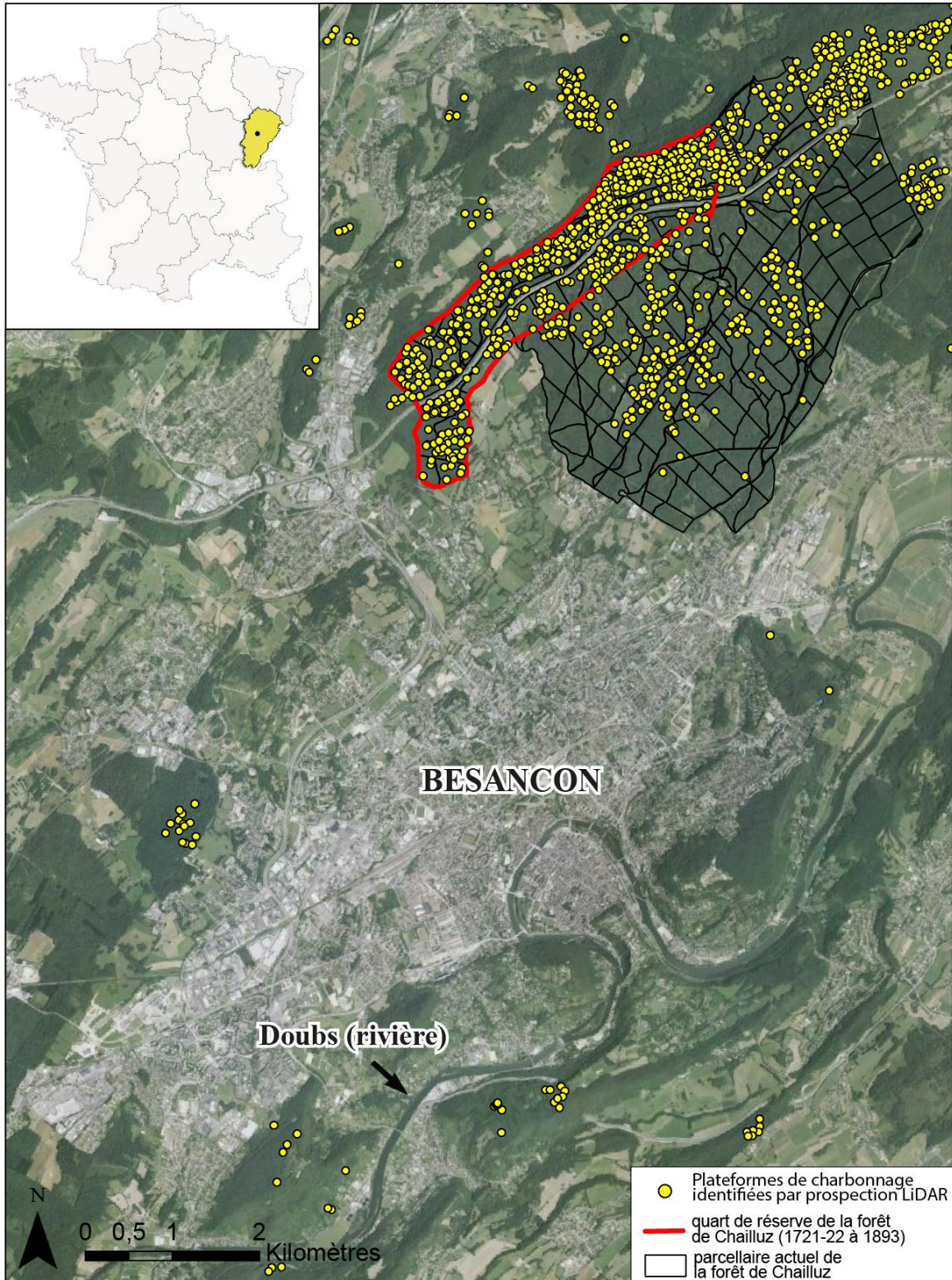


Figure i.1 : Localisation des plateformes de charbonnage identifiées par prospection LiDAR, sur la région bisontine (Data : Fruchart, 2014)

Sources et bibliographie

- Allée, P., Paradis, S., Boumédiène, F., Rouaud, R., 2010. L'exploitation médiévale du plomb argentifère sur le mont Lozère. *ArcheoSciences* 177–186.
- Antal, M.J., Gronli, M., 2003. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. *Ind Eng Chem Res* 42, 1619–1640.
- Bechmann, R., 1984. Des arbres et des hommes: la forêt au moyen âge.
- Belhoste, J., 1990. Une sylviculture pour les forges, XVIe-XIXe siècles, in: *Forges et Forêts : Recherches Sur La Consommation Proto-Industrielle de Bois*. éd. de l'école des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, pp. 219–261.
- Bond, W.J., Woodward, F.I., Midgley, G.F., 2005. The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytologist* 165, 525–538. doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x
- Bonhôte, J., Vernet, J.-L., 1988. La mémoire des charbonnières. Essai de reconstitution des milieux forestiers dans une vallée marquée par la métallurgie (Aston, Haute-Ariège). *Revue forestière française* 40, 197–212.
- Bouchey, E., 1969. le charbonnier dans les bois. *Folklore comtois*, Besançon.
- Bowman, D.M.J.S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W.J., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M., DeFries, R., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Mack, M., Moritz, M.A., Pyne, S., Roos, C.I., Scott, A.C., Sodhi, N.S., Swetnam, T.W., 2011. The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography* 38, 2223–2236. doi:10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x
- Braudel, F., 1979. *Civilisation matérielle, économie et capitalisme, XVe-XVIIIe siècle*. Tome 1 : Les structures du quotidien. Armand Colin.
- Briane, D., Doat, J., 1985. *Guide technique de la carbonisation. La fabrication du charbon de bois*. Edisud, Aix-en-Provence.
- Chalvet, M., 2011. *Une histoire de la forêt*. Éditions du Seuil, Paris.
- Chevalier, M., Scherrer, J.-J., 1955. Documents sur le développement urbain de Besançon entre 1840 et 1940. *Annales littéraires de l'Université de Besançon*.
- Corvol, A., 1987. *L'Homme aux bois: Histoire des relations de l'homme et de la forêt, XVIIe-XXe siècle*. Fayard, Paris.
- Corvol, A., Chaunu, P., Mousnier, R., 1984. *L'homme et l'arbre sous l'Ancien Régime*. Economica, Paris.
- Davasse, B., 2000. Forêts, charbonniers et paysans dans les Pyrénées de l'est du Moyen Age à nos jours: une approche géographique de l'histoire de l'environnement. Geode, Toulouse.
- Davasse, B., 1992. Anthracologie et espaces forestiers charbonnés. Quelques exemples dans la moitié orientale des Pyrénées. *Bulletin de la Société Botanique de France*, 139, 597–608.
- Deforce, K., Haneca, K., 2015. Tree-ring analysis of archaeological charcoal as a tool to identify past woodland management: The case from a 14th century site from Oudenaarde (Belgium). *Quaternary International* 366, 70–80. doi:10.1016/j.quaint.2014.05.056
- Delpech, R., Dumé, G., Galmiche, P., Timbal, J., 1985. *Vocabulaire: typologie des stations forestières*. Ministère de l'agriculture, Direction des forêts.
- Dianin, S., 1995. *Les forêts à Besançon au XVIIIème siècle (Master's thesis)*. Université de Franche-Comté.
- Diderot, D., D'Alembert, J.-R., 1751. *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*. Tome second. Permalien, Paris.
- Duby, G., 1973. *Guerriers et paysans: VII-XII siècles. Premier essor de l'économie européenne*. Gallimard, Paris.

- Euba-Rementeria, I., 2009. Explotacion de recursos forestales desde el Neolítico hasta la época moderna en el valle de la Vans-Sierra del Cadi (Alt Urgell) y del Madriu (Andorra). Tarragona. Institut Català d'Arqueologia Clàssica.
- Euba-Rementeria, I., Allée, P., 2009. Etude archéobotanique de la forêt de la Châtaigneraie limousine., in: Allée, P. (Ed.), Géohistoire et Géoarchéologie Des Territoires Forestiers Limousins. Direction régionale des Affaires Culturelles du Limousin.
- Fabre, L., 1996. Le charbonnage historique de la chênaie à Quercus ilex L. (Languedoc, France): conséquences écologiques . (PhD thesis). Université de Montpellier 2.
- Fabre, L., Gervet, X., 1992. Première approche du charbonnage et de l'histoire de la forêt méditerranéenne: l'exemple du canton d'Aniane (Hérault). Bulletin de la Société Botanique de France Actualités Botaniques 139, 617–625. doi:10.1080/01811789.1992.10827134
- FAO, 1984. Techniques simples de carbonisation. Forêts 41, 1–152.
- Fiétier, R., 1973. Recherches sur la banlieue de Besançon au Moyen Âge. Les belles lettres, Paris.
- Foley, G., 1986. Charcoal making in developing countries. Earthscan-International Institute for Environment and Development.
- Fruchart, C., 2014. Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours. (PhD thesis). Université de Franche-Comté.
- Gauthier, E., 2004. Forêts et agriculteurs du Jura : les quatre derniers millénaires. Presses universitaires Franc-Comtoises, Besançon.
- Gauthier, E., Richard, H., 2008. L'anthropisation du massif jurassien. Bilan des données palynologiques. Cahiers de Paléoenvironnement Collection.
- Hardy, B., Cornelis, J.-T., Houben, D., Lambert, R., Dufey, J.E., 2016. The effect of pre-industrial charcoal kilns on chemical properties of forest soil of Wallonia , Belgium. European Journal of Soil Science 67, 206–216. doi:10.1111/ejss.12324
- Hardy, B., Dufey, J., 2015. Les aires de faulde en forêt wallonne : repérage, morphologie et distribution spatiale. Forêt Nature.
- Hardy, B., Dufey, J., 2012a. Estimation des besoins en charbon de bois et en superficie forestière pour la sidérurgie wallonne préindustrielle (1750-1830). Deuxième partie: les besoins en superficie forestière. Revue Forestière Française 6.
- Hardy, B., Dufey, J., 2012b. Estimation des besoins en charbon de bois et en superficie forestière pour la sidérurgie wallonne préindustrielle (1750-1830). Première partie: Les besoins en charbon de bois. Révolution forestière française 4.
- Harris, W.V., 2011. Bois et déboisement dans la Méditerranée antique. Annales Histoire, Sciences Sociales 105–140.
- Husson, J.-P., 1995. Les forêts françaises. Presses universitaires de Nancy, Nancy.
- Institut pour le développement forestier, 1980. Les terrains boisés: leur mise en valeur.
- Jalut, G., Metailie, J.-P., 1991. La forêt charbonnée. Rapport final. Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement "Histoire de l'environnement."
- Léonard, J.-P., 2004. Forêt vivante ou désert boisé: La forêt française à la croisée des chemins. Biologie, écologie, agronomie, Paris.
- Léonard, J.-P., 2003. Forêt vivante ou désert boisé: La forêt française à la croisée des chemins. L'Harmattan, Paris.
- Léonard, J.-P., 1999. Contribution à la typologie des principaux systèmes forestiers. Essai de classification de forêts à partir de facteurs sociétaux générateurs. Bordeaux III.
- Lepoivre, A., 1940. Le charbon de bois. La Nature 3064, 1–35.
- Lepoivre, A., Septembre, G., 1941. Le charbon de bois, traité pratique de carbonisation., Chiron. ed. Paris.

- 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, Palaeoecology* 291, 154–165. doi:10.1016/j.palaeo.2009.09.013
- Ludemann, T., 2003. Large-scale reconstruction of ancient forest vegetation by anthracology - A contribution from the Black Forest. *Phytocoenologia* 33, 645–666. doi:10.1127/0340-269X/2003/0033-0645
- Ludemann, T., 2002. Anthracology and forest sites-the contribution of charcoal analysis to our knowledge of natural forest vegetation in south-west Germany, in: Thiébaud, S. (Ed.), *Charcoal Analysis, Methodological Approaches, Paleoeological Results and Wood Uses*. British Archaeological Reports International, pp. 209–217.
- Lusadis, L., 1989. Etude comparative des performances des meules traditionnelles zairoises et casamançaises. CATEB, Zaire.
- Magny, M., 1995. Une histoire du climat. Des derniers mammouths au siècle de l'automobile.
- Malepeyre, A.F., 1836. *Maison rustique du XIXe siècle: encyclopédie d'agriculture pratique*. Tome quatrième. Agriculture forestière, législation et administration rurale., Au Bureau. ed. Paris.
- Mangin, M., 2004. *Le fer, Errance*. ed. Paris.
- Muller, C., 1999. *La forêt de Chailluz. 1500-1674* (Master's thesis). Besançon.
- Namaalwa, J., Hofstad, O., Sankhayan, P., 2009. Achieving sustainable charcoal supply from woodlands to urban consumers in Kampala, Uganda. *International Forestry Review* 11, 64–78. doi:10.1505/ifor.11.1.64
- Paradis-Grenouillet, S., 2012. *Etudier les forêts métallurgiques: analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. L'exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin* (PhD thesis). Université de Limoges.
- Paradis-Grenouillet, S., Rouaud, R., Allée, P., Euba-Rementeria, I., 2009. De la charbonnière à la forêt combustible: l'apport de l'expérimentation., in: SRA Limousins (Ed.), *PCR : Géoarologie et Géohistoire Des Territoires Forestiers Limousins*. Limoges, pp. 143–150.
- Pèlach, A., 2005. Ten thousand years of environmental geohistory in the Central Catalan Pyrenees: Application of palaeogeographical techniques in the study of land and landscape in Coma de Burg and Vallferrera. Bellaterra.
- Peyré, J.-F.-A., 1855. *Lois des Bourguignons, vulgairement nommée Loi Gombette*. Auguste Brun, Lyon.
- Quivy, V., 1992. *Méthodologie de gestion et de valorisation par carbonisation des plantations d'Eucalyptus pellita Muell.* faculté des Sciences agronomique de Gembloux.
- Rouaud, R., 2013. *Les forêts de pente de la haute vallée de la Dordogne : enjeux écologiques et énergétiques* (PhD thesis). Université de Limoges.
- Rouaud, R., Allée, P., 2013. Anthracology in the upper Dordogne valley: a tool for the history of a charcoal producing forest. *BAR International Series* 2486, 223–231.
- Royer, C., Cheval, F., Lassus, F. (dir. ., 1988. *Gamay noir et savagnin ou les Vignoble de Franche-Comté considérés sous le rapport de l'histoire, de la géographie et de l'ethnologie*. France Régions, Belfort.
- Schenkel, Y., 1991. *Essais d'accompagnement des Bateke. Expérimentation de carbonisation par le secteur privé*. Zaire.
- Schenkel, Y., Bertaux, P., Vanwijnsberghe, S., 1997. Une évaluation de la technique de la carbonisation en meule. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 1, 113–124.
- Strezov, V., Patterson, M., Zyma, V., Fisher, K., Evans, T.J., Nelson, P.F., 2007. Fundamental aspects of biomass carbonisation. *Journal of Analytical and Applied*

- Pyrolysis 79, 91–100. doi:10.1016/j.jaap.2006.10.014
- Syred, C., Griffiths, A.J., Syred, N., Beedie, D., James, D., 2006. A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP). *Fuel* 85, 1566–1578. doi:10.1016/j.fuel.2005.10.026
- Théry, I., Chabal, L., Ntinou, M., Bouby, L., Carré, A., 2010. Du bois aux charbons de bois : approche expérimentale de la combustion. *Taphonomie de la combustion des résidus organiques et des structures de combustion en contexte archéologique : Actes de la table ronde, 27-29 mai 2008, CEPAM* 81–94.
- Vion-Delphin, F., 1991. l’approvisionnement en bois de chauffage d’une capitale provinciale au XVIIIe siècle: le cas de Besançon, in: *Le Bois et La Ville Du Moyen-Âge Au XXe Siècle. Colloque de Saint-Cloud 18-19 Novembre 1988*. pp. 51–74.
- Vion-Delphin, F., 1971. *La vie d’une forêt comtoise à l’époque moderne (1674-1789)*.
- Woronoff, D., 1994. *Histoire de l’industrie en France: du XVIe siècle à nos jours*. Seuil.
- Woronoff, D., 1990. *Forges et forêts: recherches sur la consommation proto-industrielle de bois*. Edition de l’école des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- Woronoff, D., 1984. *L’industrie sidérurgique en France pendant la Révolution et l’Empire*. Ecole des hautes études en sciences sociales.

Matériel et méthodes

1. Site d'étude

1.1 Besançon, capitale de Franche-Comté : contexte historique

Besançon fut la première place forte des Séquanes déjà à la fin de l'Âge du Fer (Vesontio). La ville fut qualifiée par César de « plus grand oppidum des Séquanes », dans la Guerre des Gaules, et elle devint même la ville principale de la « très grande province des Séquanes » au III^{ème} siècle. Au cours de l'Antiquité tardive elle est qualifiée de *Metropolis civitas Vesontiensium* dans la *Notitia Galliarum* (Walter and Barçon, 2004), tandis qu'au premier Moyen-Âge Besançon devint une cité épiscopale (Fohlen, 1981).

Vers 1032, la ville intègre le Saint-Empire germanique romain, au détriment du Comté de Bourgogne dont elle faisait partie depuis 888 (De Vregille, 1981). Dès lors, elle devint une enclave impériale dans le Comté de Bourgogne, ce qui entraîna de nombreux conflits entre le Comté et la ville. Besançon, ville libre impériale, connaît toutefois son apogée durant la première moitié du XVI^{ème} siècle (Ferreira-Lopes et al., 2015). Georges Bidalot, fit un gros travail sur l'histoire de Besançon dans les années 1990-2000 en regroupant les données d'archéologues et d'historiens. Il publia deux ouvrages notables sur cette histoire de la ville et plus largement sur l'histoire franc-comtoise, dont est issue la description synthétique des événements marquants qui suivent (Bidalot, 2012, 2009). De 1636 à 1644, les campagnes comtoises sont ravagées par les français et les suédois dans le but de récupérer le territoire au Saint-Empire. Cette Guerre de 10 ans, qui est ni plus ni moins que l'évènement comtois de la Guerre de 30 ans, a entraîné le développement d'épidémies et de famine dans la province.

En 1654 Ferdinand III échangea la Franche-Comté au royaume d'Espagne contre un petit territoire actuellement allemand. Par ailleurs, les bisontins non satisfaits de ne plus appartenir au Saint-Empire, Besançon prit, en 1664, la tête d'un nouveau baillage de 100 villages autour de la ville. En 1668, Charles II, alors roi d'Espagne, place Besançon comme capitale provisoire de la Franche-Comté, au détriment de Dole.

Les années 1670 marquèrent un tournant dans l'histoire de Besançon, puisqu'elle fut officiellement rattachée au Royaume de France en 1678 par le traité de Nimègue. Cette annexion fut acquise par une bataille sanglante dans la ville en 1674, opposant les militaires du roi d'Espagne à ceux de Louis XIV. Les lettres patentes du premier octobre 1677 officialisèrent alors le statut de Besançon comme capitale provinciale de Franche-Comté.

Suite à la Guerre de Sept ans (1756-1763), durant laquelle la France perdit ses territoires coloniaux au profit des britanniques et des espagnols, de nouveaux impôts furent imposés et augmentés, notamment à Besançon entre 1757 et 1761. S'ensuivit une succession de crises économiques à partir de 1783. Elles furent alimentées par une récolte céréalière déficitaire et un hiver particulièrement rude en 1788-89, ayant eu pour conséquences d'interdire l'exportation de graines en dehors de la ville, l'abattage du bétail, une forte mortalité chez les bisontins les plus pauvres qui ne pouvaient se fournir en bois de chauffage, et l'inondation étendue de territoires bisontins suite au dégel du Doubs. La Révolution française a semble-t-il eu également un impact assez négatif sur Besançon, puisqu'avec la suppression des provinces en 1789, la ville perdit son statut de capitale provinciale. De même, un an plus tard, la Franche-Comté fut divisée en trois départements et Besançon devint le chef-lieu de celui le plus pauvre et le moins peuplé. La suppression des universités bisontines notamment, fut une conséquence directe de ces crises économiques. Par ailleurs, le long siège militaire autrichien auquel Besançon a dû faire face à partir de 1814, permit à la ville

d'asseoir sa position stratégique et militaire et de devenir un verrou à l'est du Royaume pour la défense du pays. Besançon ne fut plus directement envahie jusqu'à la seconde guerre mondiale (Ferreira-Lopes et al., 2015).

Le développement du commerce et des industries à partir des années 1830 à Besançon marqua le renouveau de la ville. Tout d'abord, l'arrivée du canal du Rhône à Besançon en 1829 permit l'importation de vins méditerranéens de meilleur marché que le vignoble bisontin qui fut alors progressivement abandonné. Cette amélioration des conditions économiques de la ville eut pour conséquence une augmentation de la démographie de 1830 à 1851, passant de 28000 à 41000 habitants, ainsi que la réouverture des universités. De même, de nombreuses constructions furent édifiées au cours du XIX^{ème} siècle, tels que deux nouveaux ponts, le square Saint-Amour, la promenade des Glacis, le Casino ou encore le stade municipal Léo Lagrange. Mais c'est véritablement la construction de la gare de la Mouillère, en 1884, qui permit à Besançon de devenir le nouvel axe ferroviaire entre Paris et la Suisse et entre l'Alsace et Lyon. Le commerce et l'industrie devinrent de plus en plus florissants dans la ville, notamment grâce à l'ouverture d'une école d'horlogerie en 1860 qui devint même école nationale en 1891, et grâce à l'implantation de la première usine mondiale de textile synthétique la même année. Avec le développement économique et démographique national marquant les Trente Glorieuses, Besançon d'après-Guerres atteint 100000 habitants en 1963, et redevint la capitale de la Franche-Comté en 1964. Bien que la crise industrielle des années 1970 stoppa ce développement, Besançon est actuellement une référence en matière de microtechniques (Ferreira-Lopes et al., 2015) et se place 33^{ème} parmi les villes les plus peuplées de métropole.

1.2 Les forêts bisontines du XVIII^{ème} siècle

Un tiers du territoire bisontin est actuellement forestier, ce qui place la ville au quatrième rang des villes de plus de 100000 habitants, pour sa couverture forestière. Elle est même à la troisième place de ces villes pour son taux de boisement qui atteint plus de 35%, et à la première place pour son rapport espace verts/habitants (200m²/habitant). Actuellement, Besançon possède 5 forêts, dont la description ci-dessous est issue de l'étude menée par Séverine Dianin (1995). L'ensemble de ces forêts représentait alors un patrimoine boisé de près de 2065 ha, mais globalement d'assez mauvaise qualité (figure 1.1).

1.2.1 La forêt d'Aglans

La forêt d'Aglans, située au sud-est de la ville, est la plus éloignée de la cité. D'après l'analyse de plans géométriques et d'un registre sur les forêts propres à fournir du bois de chauffage à Besançon (Archive Départementale du Doubs (ADD) cotée B 17124), sa superficie était de 160 à 184 ha au cours du XVIII^{ème} siècle. Plus précisément, Séverine Dianin a pu décrire le peuplement forestier de cette forêt de 1734 à 1779, d'après l'étude d'Archives Municipales de Besançon (AMB), et d'ADD. D'après sa transcription, la forêt d'Aglans était peuplée en 1734 d'un taillis de hêtres de 10 à 30-40 ans d'âge, avec au milieu un terrain marécageux où seul le mauvais bois d'aulne était présent (AMB DD112 n°27). Il semblerait que l'apposition du quart de réserve était prévue sur un terrain où les arbres seraient de belle venue et d'âge plus avancé que ceux présents en 1734. En 1751, la forêt était peuplée d'un haut taillis mêlé de souches, où le hêtre, le charme et quelques fruitiers étaient présents (ADD B17124). L'AMB DD113 n°70 semble indiquer qu'en 1779 les baliveaux qui avaient été réservés ont été déracinés par le vent et que les jeunes recrues étaient de mauvaise venue et de bois blancs.



Figure 1.1 : Localisation des forêts appartenant à la ville de Besançon au XVIII^{ème} siècle, représentées sur la carte de Cassini datant du dit siècle.

1.2.2 Le bois de Brégille

Le bois de Brégille, situé sur un mont à l'est de Besançon, est le massif le plus proche de la ville. Il culmine à 444 m d'altitude et fait partie d'une ligne de collines morcelées en cinq tronçons (Fiétier, 1973). D'après l'analyse de Séverine Dianin de l'AMB DD113 n°59, le sol décrit dans ce texte pourrait s'apparenter à des « rendzines forestières », c'est-à-dire à des sols bruns calcimorphes. La mesure de la superficie de cette forêt au XVIII^{ème} siècle, donne des valeurs assez contradictoires d'une année à l'autre. Mais globalement, en 1738-40 la superficie était de 102 à 120 ha, et à partir de 1768, elle n'était plus que d'une soixantaine d'hectares. Le quart de réserve a été apposé en 1780 (AMB DD113 n°71). Et d'après un procès-verbal de visite non coté et deux plans levés de l'AMB Yc G2 17, de 1768 à 1778 le bois de Brégille était bordé à l'est et au nord par des vignes. Concernant le peuplement présent au cours du XVIII^{ème} siècle, Séverine Dianin a trouvé des éléments de réponse en étudiant l'ADD B 17124 et les AMB DD113 n°59 et 70, et DD132 n°8. Ainsi, en 1751, de « jeunes revenues » de 10 ans étaient présentes dans ce bois. Toutefois, en 1768, ce recépage semble avoir été étouffé par la prolifération de « buis, épines et mauvaises broussailles ». Ce n'est que 10 ans plus tard que la situation sembla s'améliorer. Cette forêt était alors peuplée de toutes essences de bois où le chêne dominait. En 1779, un « beau taillis de chênes » de 10 à 12 ans proliférait sur le massif.

1.2.3 Le Mont de Chaudanne

La forêt de Chaudanne fait également partie de la ligne de collines au sud de Besançon. Par ce fait, et bien que peu de textes ne mentionnent la nature des sols, il semble que Chaudanne soit constitué d'un « mauvais sol », apparenté à des « rendzines forestières ». Le procès-verbal d'apposition du quart de réserve de 1780 fait mention de friches, au sud et à l'est du site, et de vergers à l'ouest (AMB DD113 n°70). De 1738 à 1780, la superficie de cette forêt avoisine les 16 ha, d'après de nombreux plans levés et procès-verbaux mentionnant cette mesure. Du point de vue du peuplement forestier présent, en 1751 la forêt est composée de « jeunes revenues » de 9 à 10 ans d'âge, mais qui sont étouffées par la broussaille (ADD B 17124). C'est pourquoi en 1778, une partie du site a été recépée, qui est alors constituée de recrues de hêtres, chênes, tilleuls, frênes, charmes et noisetiers. Le tilleul, le frêne et le noisetier y étaient dominants (AMB DD132 n°8). En 1779, le jeune taillis présent de chêne, hêtre et charme est voué à devenir du « bois de haute-futaye » (AMB DD 113 n°70).

1.2.4 Le Mont de Planoise

Le mont boisé de Planoise fait également partie de la ligne de collines au sud-ouest de Besançon, et culmine à 488 m. En 1768 le sol y est décrit comme étant de mauvaise qualité, puisque visiblement constitué essentiellement de rochers escarpés, où toutefois « les revenues sont assez belles » (AMB DD113 n°59, DD132 n°8). Les différents plans et arrêt du conseil traitant de cette forêt font mention d'une superficie de 52 et 53 ha entre 1768 et 1779. Le procès-verbal d'apposition du quart de réserve de 1780 précise que la propriété d'un hectare est contestée à la ville, et que par conséquent les assiettes doivent être définies dans la partie restante (AMB DD113 n°71). Du point de vue du peuplement présent, comme à Chaudanne et à Brégille le recépage réalisé une dizaine d'année avant 1751 n'a pas été entretenu, aboutissant au développement de ronces, d'épines et de mauvais arbustes entre 1768 et 1778 (AMB DD113 n°59 et DD132 n°8). Les « revenues » sont bien présentes en 1778, mais de mauvaise qualité. Un an plus tard, un arrêt du conseil fait toutefois état d'un recépage qui aurait eu lieu 10 ou 12 ans auparavant, où le chêne, le hêtre et les bois blancs présents sont

suffisamment de belle venue pour avoir réservé de jeunes brins pour le balivage (AMB DD113 n°70).

1.2.5 Le bois Mouchet

Parmi cette liste des forêts bisontines du XVIII^{ème} siècle, il reste à citer le bois Mouchet, qui malheureusement n'est pas localisable précisément. Il semblerait qu'il était situé dans la banlieue ouest de Besançon et n'appartenait plus à la ville à partir de 1745 (AMB DD136 n°4). Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'il a été, dans sa totalité, apposé quart de réserve de la cité en 1734 (AMB DD112 n°27), très certainement en raison du sol et du terrain de bonne qualité, et du peuplement présent de chêne de belle venue âgé de 30 à 60 ans (AMB DD112 n°27). Entre 1722 et 1750, la superficie de cette forêt a été estimée à plusieurs reprises et aurait été de 36.5 à 37.5 ha (AMB DD136 et DD112 n°27).

1.2.6 La forêt de Chailluz

Le massif forestier le plus étendu du territoire bisontin, site d'étude de cette thèse, est la forêt de Chailluz.

Il s'agit d'une forêt communale faisant partie d'un massif forestier bien plus vaste de 80km² qui se poursuit au nord-est en direction de Baume-les-Dames, et située au nord de Besançon. L'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN) a classé la forêt de Chailluz en zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF) de type 1 (secteurs de grand intérêt biologique ou écologique). Une partie au nord de Chailluz est même classée en réserve biologique intégrale (RBI) (<http://inpn.mnhn.fr/zone/znieff/430007781>). La forêt de Chailluz est donc une forêt de protection, mais c'est également une forêt de loisirs puisqu'elle présente un parc animalier, des sentiers de promenade balisés ainsi qu'un parcours sportif. De plus, elle est exploitée à hauteur de 5000 m³ de bois pour le chauffage, l'industrie et le bois d'œuvre, faisant d'elle une forêt de production (Hauser, 2012). Elle est actuellement peuplée de feuillus, à dominance de hêtres et chênes, avec toutefois une partie au sud qui est dédiée à l'exploitation de conifères (ONF).

1.2.6.1 Géologie et pédologie

La forêt de Chailluz évolue sur un terrain karstique présentant une forte concentration de dolines. Il s'agit d'un plateau calcaire entre 300 et 350 m d'altitude. Ce plateau orienté sud-ouest/nord-ouest est bordé au nord par un pli montagneux culminant au nord-est à 600 m d'altitude, et descendant à 300 m à l'extrémité de la crête au sud-ouest (figure 1.2). La face sud de ce pli présente des pentes assez marquées, alors que la face nord est composée de falaises. La ligne de crête de ce pli est la limite territoriale de Besançon et également de la forêt de Chailluz.

Au pied du versant sud et dans les dolines le sol est brun acide et présente un horizon superficiel acide malgré la nature calcaire du sous-sol (Fiétier, 1973). Sur les plateaux le sol est brun calcimorphe, et donc moins favorable au développement des feuillus. Enfin, dans la pente sud-est les éboulis fixés sont de qualité très médiocre.

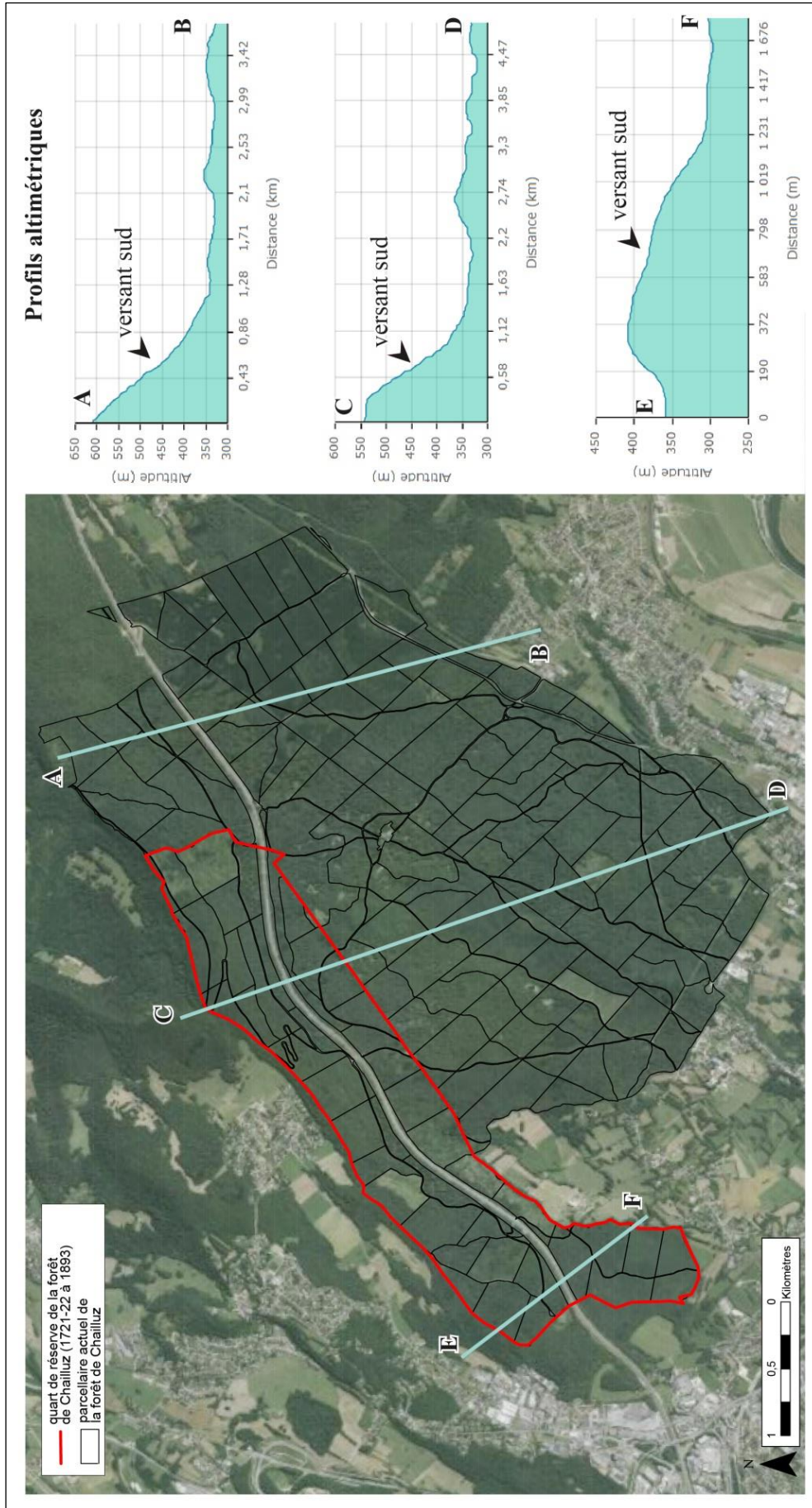


Figure 1.2 : Carte aérienne actuelle de la forêt de Chailluz, et profils altimétriques associés (Carte : géoportail)

1.2.6.2 Appartenance

Le plus ancien titre de propriété de Chailluz par la ville de Besançon date de 1268 (Bépoix, 2010; Fiétier, 1973). Mais cette forêt est déjà citée dans des textes du XIII^{ème} siècle, où elle est décrite comme étant « adulte » (Dianin, 1995; Fiétier, 1973; Muller, 1999), attestant donc de sa présence dès le XII^{ème} siècle. C'est d'ailleurs durant ce siècle qu'elle devient communale. Dès le Moyen-Âge, la propriété de Chailluz fait l'objet de multiples contestations entre les communes limitrophes. Et durant les XVI^{ème} et XVII^{ème} siècles, l'autorité de la forêt de Chailluz continua à être revendiquée par le Comté de Bourgogne et par la ville de Besançon. Mais en 1705, un arrêt de la chambre souveraine la déclare propriété de Besançon (AMB n°53228).

1.2.6.3 Superficie

La superficie de la forêt de Chailluz semble avoir augmenté au cours du XVIII^{ème} siècle. En 1699, elle était de 1164 ha (AMB YcM1 43). En 1704, elle était de 1625 ha (AMB YcG2 47). En 1721, le résultat de l'arpentage donnait une valeur de 1646 ha (AMB DD112 n°6). Et en 1750, lors de la seconde apposition du quart de réserve, l'arpentage fournissait une valeur de 1675 ha (AMB DD113 n°55). En réalité, ces fluctuations de superficie auraient tout aussi pu être dues aux techniques d'arpentage qui se sont améliorées au cours du siècle. D'autant plus qu'aujourd'hui la superficie de Chailluz est de 1673 ha.

1.2.6.4 Application de l'ordonnance de Colbert de 1669

C'est seulement en 1721 ou 1722 que le quart de réserve de la forêt de Chailluz fut apposé et le restant découpé en 30 parcelles égales, dont la première assiette fut coupée en 1724 (Fruchart, 2014). Le quart de réserve fut exploité par deux fois. La première fois, la coupe extraordinaire avait été ordonnée pour la construction de nouvelles casernes militaires à Besançon, et dura 8 ans, à partir de 1738 ou 1739. Entre les deux exploitations, le quart de réserve a été apposé une seconde fois en 1750, accompagné d'un nouveau règlement des assiettes (Dianin, 1995). La seconde coupe extraordinaire était également destinée à la construction de bâtiments militaires, mais cette fois pour de nouveaux pavillons d'officiers. Cette coupe dura de 1770 à 1784. Enfin, l'analyse de plans géométriques démontra qu'en 1893 le quart de réserve de la forêt de Chailluz fut parcellisé, et n'assurait donc plus cette fonction de bois de réserve (Fruchart, 2014).

1.2.6.5 Peuplement forestier présent au moment du nouveau règlement des assiettes (1750)

Le procès-verbal de visite de la forêt de Chailluz de 1750 (AMB DD113 n°8) décrit un quart de réserve composé d'un taillis de chêne, hêtre, charme et autres bois blancs, de 11 ans et 3 ans d'âge, ainsi que d'un taillis de 25 ans de belle venue présentant quelques chênes et hêtres de 40 à 100 ans d'âge (figure 1.3). Les trois quarts restants de cette forêt sont décrits, dans sa partie ouest, comme étant composés d'un taillis de chêne, charme et autres bois blancs, de 15 à 25 ans d'âge. La partie est des $\frac{3}{4}$ restants semblait présenter un terrain qui n'avait pas encore été exploité depuis la première apposition des assiettes en 1721 ou 1722. Ce terrain peut donc être assimilé au peuplement présent avant l'application de l'ordonnance de Colbert. Il est décrit comme étant composé de vieilles souches, ainsi que de hêtres et de charmes de 1 à 2 m de hauteur, tous ébranchés et « rabougris », victimes de l'ancien usage. De nombreuses places étaient vides, résultant de coupes irrégulières (AMB DD113 n°8 et 59 et DD132 n°8). Le taillis était quasi inexistant, nécessitant, d'après les procès-verbaux, un

nouveau recépage pour qu'il se développe, d'autant plus que les épines et la broussaille présentes étouffaient les jeunes arbustes. Quelques chênes de belle venue, de 30 à près de 100 ans d'âge, étaient toutefois parsemés sur le terrain. La partie ouest était quant à elle composée de taillis de 15, 20 et 25 ans où le chêne dominait sur le charme, le tremble et les autres bois blancs.

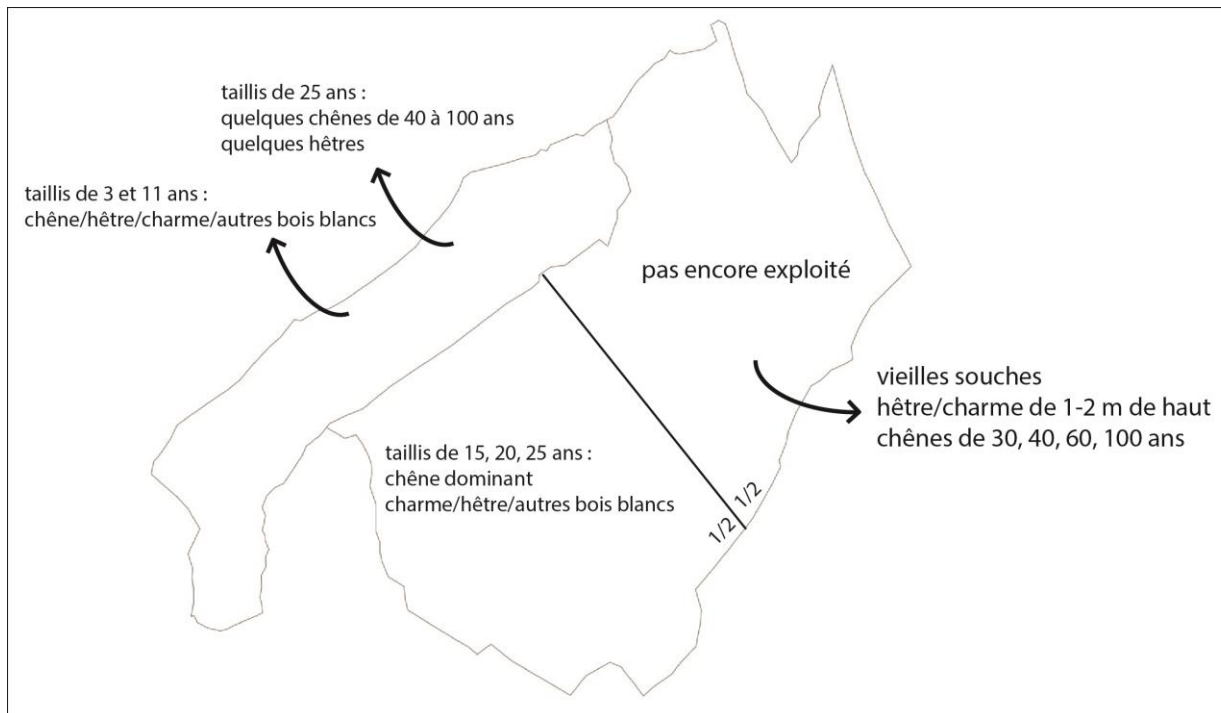


Figure 1.3 : Représentation schématique des peuplements forestiers de la forêt de Chailluz en 1750. Les données sont issues de la transcription des AMB DD113 n°8 et 59 et DD132 n°8 par Séverine Dianin.

2. Le matériel d'étude : les plateformes de charbonnage de la forêt de Chailluz

Comme déjà évoqué en introduction, près d'un millier de plateformes de charbonnage a pu être décelé sur le massif forestier de Chailluz grâce à la technologie LiDAR (**figure i.1**). Ces plateformes sont d'autant plus difficiles à observer en prospection pédestre lorsqu'elles sont situées sur le plateau de la forêt. En effet, dans ces endroits le relief topographique était tellement faible que le charbonnier n'a eu qu'à niveler légèrement la place à charbon pour obtenir une aire de faulde homogène et plus ou moins horizontale (**figure 1.4, vignettes de droite**). En revanche, les plateformes situées sur le versant de la forêt présentaient des aménagements de mise à niveau de la place, tels que des murs de soutènement (**figure 1.4, vignette de gauche**), bien plus adaptés pour la détection par prospection pédestre. De manière générale, les plateformes oscillaient entre 8 à 10 m de diamètre.

Aucun des profils de sol des plateformes analysées dans le cadre de cette thèse ne présentait d'horizons charbonneux séparés par des couches stériles. Effectivement, tous étaient composés d'un seul et même horizon charbonneux plutôt homogène d'au moins 20 cm d'épaisseur (**figure 1.5**). Plus précisément, sur le versant les deux aires de faulde prospectées comportaient un horizon riche en charbons de près de 27 cm d'épaisseur, et dont les couleurs

pédologiques sur l'entièreté du profil, définies grâce au code Munsell (Munsell, 2000) étaient similaires (gamme de teinte 5YR). Sur le plateau, deux zones ont été différenciées en fonction des stations forestières présentes (partie développée dans le **chapitre 3**). Dans la zone à chailles, les épaisseurs des horizons charbonneux identifiés sont du même ordre que sur le versant, avec des valeurs allant de 27 à 32 cm. La plateforme CH41 fait exception, avec une épaisseur de couche charbonneuse de 21 cm. De même, les 20 cm les plus profonds des horizons charbonneux des places CH31 et CH32 présentent en réalité des agrégats de couleurs différentes, preuve du mélange entre l'horizon charbonneux et l'horizon sous-jacent. Toutefois, de manière générale, les plateformes de la zone à chailles ont des profils de sol de couleurs similaires, sur la gamme de teintes 10YR. Sur le reste du plateau, les places à charbons ont des profils de sol assez similaires en épaisseur si l'on considère les couches de transition comme faisant partie de l'horizon charbonneux. Ils sont de 31 à 38 cm d'épaisseur, donc légèrement plus développés que sur le reste de la forêt. Par ailleurs, les couleurs de ces profils sont nettement plus hétérogènes, avec des gammes de teinte allant de 2.5YR à 10YR.



Figure 1.4 : Plateformes de charbonnage CH29, CH31 et CH41 en forêt de Chailluz (photos: A. Dupin et D. Daval)



Figure 1.5 : Photographies des profils de sol des plateformes de charbonnage analysées de la forêt de Chailluz. Identification colorimétrique d'après le code Munsell.

3. Méthodes : L'anthracologie

3.1 Généralités

L'anthracologie est la discipline de l'archéobotanique dont le matériel d'étude est le charbon de bois issu de sites archéologiques ou de sédimentation naturelle, dans le but, selon le contexte, de déterminer les caractéristiques du combustible exploité, si ce n'est de restituer la végétation passée (Dieudonné-Glad, 2010; Dunikowski et al., 1995; Eschenlohr et al., 1991; Pelet et al., 1978). La discipline est née en 1864 avec les travaux de scientifiques allemands, hongrois et français, qui analysaient les charbons de bois en lame mince au microscope à transmission (Bourquin-Mignot et al., 1999). C'est dans les années 1960-1970 que l'anthracologie est révolutionnée par les études d'anthracologues tels que Jean-Louis Vernet (e.g. Bonhôte and Vernet, 1988; Vernet, 1973) et Fritz H. Schweingruber (e.g. Schweingruber, 1978). Dès lors, l'analyse des charbons se fait par l'observation au microscope optique à réflexion, de fragments obtenus par cassure fraîche. Cette manipulation est plus adaptée et plus rapide que l'utilisation du microscope à transmission ou le microscope électronique à balayage. Ce n'est réellement qu'à partir des années 1990 que les anthracologues français sont sortis de l'étude des sites métallurgiques à proprement parlé,

pour se tourner directement vers les sites de production de charbons de bois, dans le but d'obtenir une composition la plus fidèle des sylvo-faciès anciens (Davasse, 1989; Dubois et al., 1996; Jalut and Metailie, 1991).

3.2 Les outils de l'anthracologie

L'étude anthracologique repose essentiellement sur le fait que le charbon de bois analysé ait conservé les caractéristiques anatomiques du bois initial. Dans ces conditions, l'identification de l'espèce du bois charbonné est possible à partir de l'analyse du charbon (anthraco-analyse). En effet, cette identification est réalisée par anatomie comparée, en utilisant des échantillons de références, ou/et par l'utilisation de clefs de détermination telle que celles de Fritz H. Schweingruber (Schweingruber, 1990a, 1990b), basées sur les caractéristiques anatomiques du bois. L'anthraco-analyse permet dans un premier temps de définir l'approche analytique à adopter et les questions auxquelles il est possible de répondre. Dans le cas de l'étude des plateformes de charbonnage, l'approche adoptée peut varier selon la destination du charbon de bois produit. Certaines métallurgies par exemple, sont bien plus demandeuses de charbon de chêne que d'autres taxons, puisqu'il semble de meilleure qualité (Malepeyre, 1836). Dans cette situation, la fabrication du charbon sur la plateforme a été donc volontairement menée qu'avec des bois de chêne. L'anthraco-analyse de ces plateformes permet alors de mettre au jour cette sélection de taxons, mais certainement pas d'approcher la composition taxonomique de la végétation au moment du charbonnage. A l'inverse de cette approche archéo-ethnobotanique, l'anthraco-analyse des aires de faulde où l'artisan charbonnier produisait du charbon avec le tout-venant, tels qu'il a pu être observé sur de nombreuses plateformes anciennes (Davasse, 2000; Deforce et al., 2013; Knapp et al., 2013; Ludemann, 2010; Nelle, 2003; Paradis-Grenouillet, 2012), permet d'accéder à l'image des sylvo-faciès passés. C'est finalement la courbe d'effort rendement, exprimant le nombre d'essences identifiées en fonction du nombre de fragments analysés, qui permet de déterminer si le nombre de fragments analysés est suffisant pour être représentatif de l'échantillon.

L'estimation du diamètre des fragments de charbons de bois (dendro-anthracologie) est également un outil de l'anthracologie, permettant de déterminer le diamètre du bois dont il est issu, à la condition que le charbon provienne d'une partie externe de la tige (proche de l'écorce). Dans le cas des charbons des aires de faulde, la dendro-anthracologie peut alors donner accès à la gestion de l'espace forestier charbonné, et caractériser la pratique de charbonnage : Quel(s) est (sont) le(s) mode(s) de régénération sylvicole (taillis, TSF, futaie) présent(s) et utilisé(s) au moment du charbonnage ? Quelle(s) est (sont) la(es) partie(s) de la tige qui étai(en)t utilisé(es) pour la pratique ?

La dendro-anthracologie est un outil plus récent que l'anthraco-analyse, et qui a évolué rapidement ces dix dernières années grâce à l'élaboration de nouvelles méthodes de mesure. Sur les premières années, le diamètre du charbon de bois était estimé qualitativement en fonction de la courbure des cernes. Puis très vite, Cette estimation s'est précisée en utilisant une cible imprimée présentant des diamètres connus sur laquelle les courbures de cerne du charbon étaient comparées. C'est à partir des années 2000 que la méthode de mesure a pris un tournant bénéfique pour la dendro-anthracologie, en se basant non plus uniquement sur les courbures de cerne qui étaient trop souvent hasardeuses, mais également sur la position des rayons ligneux (Dufraisse, 2006, 2002; Dufraisse and Garcia Martinez, 2011; Garcia Martinez and Dufraisse, 2012; Paradis-Grenouillet, 2012). La méthode Dufraisse permet ainsi de mesurer le diamètre du charbon de bois de manière plus précise et plus fiable. Cette méthode est détaillée dans le **chapitre 4** de ce manuscrit.

En complément de ces outils employés traditionnellement en anthracologique, l'analyse raman et l'étude micromorphologique, qui sont des outils encore peu, voire pas utilisés pour l'étude des plateformes de charbonnage, ont été employés sur les profils de sol des aires de faulde de la forêt de Chailluz. Le détail de ces deux méthodes est présenté dans le **chapitre 5** de ce manuscrit.

Sources et bibliographie

- Bépoix, S., 2010. Une cité et son territoire: Besançon 1391, l'affaire des fourches patibulaires. Presses universitaires de Franche-Comté 71.
- Bidalot, G., 2012. Comment les francs-comtois sont devenus français. Editions du Belvédère, Pontarlier et Fleurier.
- Bidalot, G., 2009. Besançon, des origines à nos jours: histoire politique et économique d'une ville. Presses du Belvédère, Pontarlier et Fleurier.
- Bonhôte, J., Vernet, J.-L., 1988. La mémoire des charbonnières. Essai de reconstitution des milieux forestiers dans une vallée marquée par la métallurgie (Aston, Haute-Ariège). *Revue forestière française* 40, 197–212.
- Bourquin-Mignot, C., Brochier, J.-E., Chabal, L., Crozat, S., Fabre, L., Guibal, F., Marinval, P., Richard, H., Terral, J.-F., Thery-Parisot, I., 1999. La botanique, Errance. ed. Paris.
- Davasse, B., 2000. Forêts, charbonniers et paysans dans les Pyrénées de l'est du Moyen Age à nos jours: une approche géographique de l'histoire de l'environnement. Geode, Toulouse.
- Davasse, B., 1989. Restitution de la dynamique historique du paysage forestier des Pyrénées ariégeoises par l'anthraconoanalyse des charbonnières, in: *Bioceneses D'altitude 3. Montagnes d'Europe*. Centre Pyrénéen de Biologie et Anthropologie des Montagnes, Pau.
- De Vregille, B., 1981. Hugues de Salins. Archevêque de Besançon 1031-1066. Cêtre, Besançon.
- Deforce, K., Boeren, I., Adriaenssens, S., Bastiaens, J., De Keersmaecker, L., Haneca, K., Tys, D., Vandekerckhove, K., 2013. Selective woodland exploitation for charcoal production. A detailed analysis of charcoal kiln remains (ca. 1300-1900 AD) from Zoersel (northern Belgium). *Journal of Archaeological Science* 40, 681–689. doi:10.1016/j.jas.2012.07.009
- Dianin, S., 1995. Les forêts à Besançon au XVIIIème siècle (Master's thesis). Université de Franche-Comté.
- Dieudonné-Glad, N., 2010. L'atelier de réduction du Latté à Oulches, in: Dumasy (Ed.), *Travail De La Terre, Travail Du Fer*. Bordeaux, pp. 262–366.
- Dubois, C., Metailie, J., Izard, V., 1996. Archéologie de la forêt charbonnée: questions et méthodes, illustrées par l'exemple du site de Lercoul (Ariège), in: *XVIIè Rencontres Internationales D'archéologie et D'histoire d'Antibes*. pp. 525–540.
- Dufraisse, A., 2006. Charcoal anatomy potential, wood diameter and radial growth. *Bar International Series* 1483, 47.
- Dufraisse, A., 2002. Les habitats littoraux néolithiques des lacs de Châlain 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*.
- Dufraisse, A., Garcia Martinez, M.S., 2011. Measuring firewood diameters from charcoal analysis . Dendrometrical tools and data interpretation Outils dendrométriques et interprétation des données. *Anthropobotanica* 2, 18.
- Dunikowski, C., Cabboi, S., Amandry, M., 1995. La sidérurgie chez les Sénons: les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne) (vol.51). *Maison des Sciences de l'Homme*.
- Eschenlohr, L., Serneels, V., Hiltbold, B., 1991. Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (JU, Suisse). Office du patrimoine historique et Société jurassienne d'émulation.
- Ferreira-Lopes, H., Abbiateci, C., Guilleray, P.-E., Bouveresse, M., 2015. Besançon en 100 dates. Editions Sutton, Saint-Avertin.
- Fiétier, R., 1973. Recherches sur la banlieue de Besançon au Moyen Âge. *Les belles lettres*,

- Paris.
- Fohlen, C., 1981. Histoire de Besançon. Tome 1. Des origines à la fin du XVIe siècle. Cêtre, Besançon.
- Fruchart, C., 2014. Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours. (PhD thesis). Université de Franche-Comté.
- Garcia Martinez, M.S., Dufraisse, A., 2012. Correction factors on Archaeological wood diameter estimation. Wood and Charcoal Evidence for human and natural history SAGVNTVM EXTRA-13 283–290.
- Hauser, J.-F., 2012. Dossier: Chailluz, la forêt des Bisontins. La Presse Bisontine 134, 19–23.
- Jalut, G., Metailie, J.-P., 1991. La forêt charbonnée. Rapport final. Programme interdisciplinaire de recherche sur l'environnement "Histoire de l'environnement."
- Knapp, H., Robin, V., Kirleis, W., Nelle, O., 2013. Woodland history in the upper Harz Mountains revealed by kiln site, soil sediment and peat charcoal analyses. Quaternary International 289, 88–100. doi:10.1016/j.quaint.2012.03.040
- 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, Palaeoecology 291, 154–165. doi:10.1016/j.palaeo.2009.09.013
- Malepeyre, A.F., 1836. Maison rustique du XIXe siècle: encyclopédie d'agriculture pratique. Tome quatrième. Agriculture forestière, législation et administration rurale., Au Bureau. ed. Paris.
- Muller, C., 1999. La forêt de Chailluz. 1500-1674 (Master's thesis). Besançon.
- Munsell, A.H., 2000. Munsell soil color charts, revised wa. ed. New Winsor, NY.
- Nelle, O., 2003. Woodland history of the last 500 years revealed by anthracological studies of charcoal kiln sites in the Bavarian Forest, Germany. Phytocoenologia 33, 667–682.
- Paradis-Grenouillet, S., 2012. Etudier les forêts métallurgiques: analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. L'exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin (PhD thesis). Université de Limoges.
- Pelet, P.L., de Carvalho, B., Decollogny, P., 1978. Fer, charbon, acier dans le pays de Vaud. Bibliothèque historique vaudoise.
- Schweingruber, F.H., 1990a. Anatomy of European woods. Paul Haupt Berne and Stuttgart Publishers.
- Schweingruber, F.H., 1990b. Microscopic Wood Anatomy. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf.
- Schweingruber, F.H., 1978. Microscopic wood anatomy. Swiss Federal Institute of Forestry Research.
- Vernet, J., 1973. Etude sur l'histoire de la végétation du sud-est de la France au Quaternaire, d'après les charbons de bois principalement. Université des sciences et techniques, Laboratoire de paléobotanique, Montpellier.
- Walter, H., Barçon, J.-C., 2004. Vesontio, Besançon. Presses universitaires de Lyon, Lyon.

Chapitre 2

Apport des sources historiques pour la quantification des différentes productions de bois de la forêt de Chailluz au XVIII^{ème} siècle. La place du charbonnage au sein de cette gestion forestière

La **table 2.1** présente les conversions utilisées dans les différents calculs de ce chapitre. Par ailleurs, nous précisons ici que l'estimation des volumes de bois reste sujette à discussion puisque quatre types de cordes de bois existaient avant le XVIII^{ème} siècle. Les différentes sources archivistiques qui ont pu être transcrites au cours de ce travail de thèse ne mentionnaient jamais lequel de ces types de corde était utilisé. Toutefois, la corde d'ordonnance, la corde de bois de chauffage et la corde des Eaux et Forêts semblent avoir été supplantées en Franche-Comté au XVIII^{ème} siècle par la corde charbonnière, en raison de l'influence des usines métallurgiques qui proliférèrent durant ce siècle (Delsalle, 2004; Plaisance, 1963; Vion-Delphin, 1991; Vion-Delphin and Lassus, 1989). Nous avons donc pris le parti d'utiliser la valeur de la corde charbonnière dans l'ensemble des calculs de ce chapitre, bien qu'étant conscients que les trois autres types auraient tout aussi bien pu être utilisés.

Table 2.1 : Conversions utilisées dans les calculs de ce chapitre.

sources	une unité	équivalence
unité de contenance		
Delsalle, 2004 / Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1900	1 corde charbonnière	2,742 stères
CSBI	1 stère	0,75m3 de bois non écorcé
déduction par calcul	1 corde charbonnière	2,0565 m3
unité de poids		
Hardy et Dufey, 2012 / FAO, 1984	1 m3 charbon	235 kg
Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1800	1 stère moyen bois dur, bois blanc	350 kg
unité de longueur		
Fruchart, 2014	1 arpent	100 perches des Eaux et Forêts
	1 perche des Eaux et Forêts	22 pieds de roi
	1 pied	12 pouces
	1 pied de roi	0,325 m
Dianin, 1995 /Lassus, 1968	1 arpent royal	0,5107 hectare
monnaie		
Lassus, 1968	1 livre tournois	20 sols
	1 sol	12 denier

1. Des archives municipales de Besançon (AMB) encore à étudier

Les archives municipales de Besançon comprennent de nombreux documents traitant de l'exploitation de la forêt de Chailluz, de sa production de bois à la consommation bisontine du bois produit. Il n'a pas été possible dans le temps imparti de la thèse de consulter l'entièreté de ces documents, toutefois un inventaire non exhaustif des archives traitant de près ou de loin de la forêt de Chailluz est dressé **en annexe 3**, dans le but de pouvoir y revenir ultérieurement pour compléter les résultats de ce chapitre. Cet inventaire a été facilité par l'utilisation du site memoirevive.besancon.fr, mettant à disposition la liste complète des archives municipales de Besançon et au moins leurs descriptifs, si ce n'est le scan des documents. Pour dresser cet inventaire, la recherche d'archives sur le site internet a été réalisée avec les mots-clefs « Chaillu », « quart de réserve », « charbon » et « boi ».

Par ailleurs il pourrait être intéressant d'essayer d'étoffer cet inventaire en consultant 7 des 9 fonds que regroupent les archives municipales de Besançon, dont la recherche par mots-clefs n'a pas aboutie, mais dont le contenu pourrait concerner malgré tout la forêt de Chailluz. Ce court premier paragraphe détaille l'intérêt de ces 7 fonds pour ce sujet de thèse.

1.1 Les listes électorales entre 1824 et 1914, cotées de 1K28 à 1K62

Elles recensent les hommes domiciliés dans le Doubs, leur nom et prénom, leur profession, leur lieu de domicile ainsi que la quotité et la nature de leur contribution pécuniaire. Ainsi l'énumération des travailleurs du bois sur 90 ans dans le département du Doubs, pourrait fournir des informations quant à la localisation et à l'expansion des activités sidérurgiques sur le territoire bisontin. A titre d'exemple, la liste électorale de 1824 fait mention de trois maîtres de forges. Un dans le canton de Quingey, un dans celui de Vercel et un dans celui d'Audincourt. Aucun n'a été recensé dans le canton de Besançon. Le seul artisan du métal cité dans ce canton est un artisan orfèvre. La présence d'au moins deux martinets ou taillanderies à Besançon en 1788 ([Lassus, 1968](#)) ne semble donc plus être effective en 1824. Ces listes électorales sont toutefois à utiliser avec précaution puisqu'elles présentent un biais de représentation de la population. En effet, l'inventaire omet les mineurs, les femmes, les étrangers/migrants et toutes autres personnes n'ayant pas le droit de vote, tels que les charbonniers nous pouvons l'imaginer. De plus, l'activité de charbonnage étant souvent associée secondairement à d'autres métiers du bois (**Introduction** du manuscrit), il semble peu probable que les charbonniers soient recensés sous cette dénomination sur ces listes électorales.

1.2 Les registres paroissiaux de 1543 à 1794 (série GG des AMB)

Ils regroupent les actes de baptêmes, de mariage et de décès délivrés par les 7 paroisses bisontines sur cette période. Une nouvelles fois, ces registres pourraient fournir des informations sur les ouvriers du bois ou de la métallurgie. En revanche, la transcription de ces archives peut être extrêmement chronophage et fastidieuse. Par exemple, pour la seule année 1792, le registre de la paroisse de Saint-Jean-Baptiste ([AMB GG38](#)) comporte 154 feuillets manuscrits.

1.3 Les registres d'état-civil de 1792 à 1912

Ils regroupent les état-civils de baptême, de mariage et de décès, et à ce titre permettraient également de fournir des informations importantes quant aux charbonniers

présents à Besançon par exemple. Mais une nouvelle fois, la transcription de ces registres est un travail de longue haleine nécessitant une étude archivistique à part entière, et ne pouvant être réalisée dans le temps imparti de ce travail de thèse. Pour information, rien que pour la période révolutionnaire les registres comprennent 222 archives (AMB 1E1 à 1E219 et AMB 1E567 à 1E569), d'une centaine de feuillets manuscrits chacune. Pour la période postérieure les registres comportent 349 archives, allant jusqu'à 500 feuillets chacune. Ces registres d'Etat-civil comprennent également des tables décennales des naissances, mariages et décès de 1792 à 1912. Malheureusement, ces tables ne mentionnent pas les professions des nommés et une nouvelle fois, l'étude de ces documents serait extrêmement chronophage. Les 14 tables disponibles (AMB 1E300 à 1E314) comportent un millier de pages chacune.

1.4 Les recensements de la population de 1836 à 1911 (sous-série 1F des AMB)

Ils énumèrent la totalité de la population résidant à Besançon, y compris les mineurs et les femmes, tous les 5 ans sur la période de 1836 à 1911. Ces recensements ont été effectués et classés par quartier de résidence. Certainement plus complets que les listes électorales ou les état-civils, ils mentionnent le nom, le prénom, la profession, l'âge et la situation maritale de chaque personne recensée. Par ailleurs, la mention de la profession est une nouvelle fois sujette à discussion puisque le charbonnage est une activité bien souvent secondaire à un autre métier du bois. La transcription de ces recensements est également un travail fortement chronophage puisqu'ils ne comportent pas moins de 130 archives (AMB 1F1 à 1F55, 1F126 à 1F199 et 1F201) de près de 600 feuillets chacune.

1.5 Les registres de délibérations du Conseil municipal de 1290 à 2000

Ils mentionnent tout état de fait à l'encontre des citoyens et les décisions prises par le maire. Ces registres sont classés selon trois périodes. Les archives de la série BB (AMB BB1 à BB201) traitent de la période de 1290 à 1789. Un résumé détaillé a été réalisé en 1912 pour chacune de ces archives et ajouté au format PDF sur le site memoirevive.Besancon.fr, permettant une recherche par mots-clés. Les mots-clés utilisés pour cette étude ont été « boi », « chaillu » et « charbon ». Plusieurs archives de cette série ont pu alors être listées sur l'inventaire des archives traitant du bois à Chailluz, consultable **en annexe 3**. La sous-série 1D regroupe les registres de 1790 à 1957 et comprend 123 archives (AMB 1D1 à 1D72 et 1D198 à 1D248) comportant près de 500 feuillets chacune. La sous-série 222W regroupe les registres de 1958 à 2000 et comprend 56 documents (AMB 222W1 à 222W56) également de près de 500 feuillets chacun. La recherche dans ces deux dernières sous-séries peut être laborieuse puisqu'aucun résumé détaillé n'a été réalisé. Toutefois, elle pourrait s'avérer utile pour la compréhension de l'usage abusif de la forêt de Chailluz.

1.6 Les cadastres de Besançon de 1834 à 1974

Ils regroupent des informations sur les immeubles bâtis et non bâtis situés sur la commune de Besançon. L'ensemble de ces documents est consultable en ligne. L'atlas cadastral napoléonien regroupe des plans des différentes sections de la commune (AMB 3P57/117-123), notamment des plans de la forêt de Chailluz. Le reste des documents fiscaux de la commune sont regroupés dans la sous-série 1G (AMB 1G à 1G495). Ces documents comportent entre autres, des informations sur le prix de l'hectare, la nature et la superficie de la propriété ou de la culture. Chaque archive comportant près de 500 tableaux, leur analyse aurait nécessité une nouvelle fois un temps d'étude excessivement long pour la durée de la thèse.

1.7 Les comptes et impôts

Les registres de compte disponibles sur memoirevive.besancon.fr de 1388 à 1790 renferment les recettes et les dépenses faites au cours de cette période par la ville de Besançon, pour différentes missions. Il serait intéressant d'étudier ces archives dans l'optique de trouver des informations sur la vente des bois de Chailluz par exemple. Ces registres sont des documents manuscrits, cotés de CC1 à CC342, de près de 150 feuillets chacun.

2. Caractérisation de la productivité et de la production de la forêt de Chailluz au XVIII^{ème} siècle

Nous avons choisi d'employer le terme de « productivité » pour parler de la production de bois et de charbon de bois, puisque ce terme connote un rapport de causes à effets entre l'intensité de la production, tels que le rendement et la récurrence de la pratique, et les contextes économique, sociétal et environnemental du site (Actu Environnement, 2012).

En effet, en prenant l'exemple du charbonnage, il semble de bon sens de dire que pour répondre à des besoins forts en charbon de bois, la proportion de surfaces exploitées pour le charbonnage, ou en tout cas son intensité, soient augmentées en conséquence. La production de charbon et son intensité dépendent ainsi de la disponibilité des facteurs de production, tels que la biomasse disponible qui est la matière première d'une charbonnière, l'élaboration de la plateforme sur laquelle la meule est érigée, l'outillage utilisé, ou encore le transport du bois et du charbon par des machines ou des bêtes de somme (INSEE; Ghali et al., 2014). Le terme de productivité lie également la production de charbon aux savoir-faire accumulés, bien que difficilement appréhendable, aux dépenses liées à la pratique et aux densités de population, consommatrice de bois de feu (Dumolard, 1973).

L'analyse des AMB a permis de quantifier la productivité et la production de bois sortant de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz, ainsi que la production du quart de réserve durant la première coupe extraordinaire. Le paragraphe présent détaille cette analyse, dans le but de confronter les données de la forêt de Chailluz avec la consommation de bois des bisontins et de l'industrie métallurgique, calculée dans le paragraphe 3.

2.1 Caractérisation et production de bois du quart de réserve de la forêt de Chailluz lors de la première coupe extraordinaire

La transcription des AMB DD112, DD114 et DD115 nous a permis de restituer la chronologie de la première coupe extraordinaire du quart de réserve, à savoir de 1739 à 1747. Cette chronologie est présentée en détail en **figure 2.1**. Ces documents ont ainsi fourni des

informations précieuses et quantitatives sur la régie de ce canton. C'est pourquoi les données qui suivent concernent cette période et se réfèrent à cette chronologie.

L'étude des fonds archivistiques concernant la seconde exploitation, de 1775 à 1784 n'a pu être entreprise compte tenu du temps imparti de la thèse. Toutefois, les **AMB DD115, DD132, 4M11, EE33, EE34** contiennent des documents concernant cette seconde coupe extraordinaire, comme l'atteste leurs descriptions présentées en **annexe 3**. Il serait intéressant de réaliser le même travail que celui fait sur la première exploitation dans l'objectif de caractériser l'évolution de la production de bois de réserve au cours du XVIII^{ème} siècle, et non plus de caractériser la production seulement sur une courte période.

2.1.1 Caractérisation de la première coupe extraordinaire

En août 1738, le nombre de casernes présentes à Besançon étant insuffisant, les militaires étaient obligés de loger chez les citoyens et Bourgeois bisontins. L'incommodation des uns et des autres nécessitait alors la construction de nouvelles casernes, estimée à 463000 livres. Sa Majesté le roi ayant fourni 80000 livres, il restait alors 383000 livres à fournir à la ville. Le quart de réserve de la forêt de Chailluz a donc été mis en vente par adjudication en janvier 1739. D'après le cahier des charges sur les conditions de vente du quart de réserve l'adjudicataire devait fournir 5000 cordes de bois, soit **13710 stères au chantier des nouvelles casernes d'ici la fin de l'exploitation (figure 2.1)**. De plus, la vente des 690 arpents a été adjugée en janvier 1739 à 151800 livres, qui devait être payée par l'adjudicataire, à la Trésorerie de la Ville, par tranches annuelles de 25300 livres par an, sur 6 ans. Le canton devait donc être divisé en 6 triages égaux exploités sur 6 ans.

Toutefois, à travers l'étude des différents procès-verbaux et mémoires relatant les entreprises faites lors de cette coupe extraordinaire, nous avons pu constater que l'adjudicataire ne respectait absolument pas le cahier des charges (**figure 2.1**). Au 30 mai de la première année d'exploitation, l'adjudicataire avait déjà exploité 56.6 ha sur les 58.2 ha prévus pour l'année 1739. Le 17 août de la seconde année, les magistrats de la ville rédigèrent une lettre pour le contrôleur général, en expliquant que l'adjudicataire avait **déjà exploité plus du tiers** de la totalité des bois, **sans faire parvenir les cordes au chantier, ni verser le premier paiement à la Trésorerie de la ville**. De plus il avait déjà **vendu l'entièreté des bois, du charbon et de la chaux**. En mars de la troisième année, aucune somme d'argent n'avait encore été versée à la ville et les casernes n'avançaient pas. En juillet 1742 (quatrième année), il ne restait que 5 ha à exploiter. Finalement, pour l'ensemble de ses méfaits, l'adjudicataire était insolvable et le 22 mars 1741, le contrôleur général chargea le magistrat de vendre une seconde fois le quart de réserve par fol enchère et de faire saisir les bois destinés à la construction des casernes. Un nouveau cahier des charges fut bien rédigé le 18 mars 1743, cependant nous n'avons trouvé **aucun document confirmant** que le canton avait été revendu, ni **que les 13710 stères avaient été voiturés jusqu'au chantier de construction des casernes**.

2.1.2 Productivité du quart de réserve de la forêt de Chailluz en 1738

Par deux fois avant la première coupe extraordinaire, le magistrat de Besançon a ordonné de faire estimer la productivité du quart de réserve, ceci dans le but d'estimer la valeur du canton lors de la vente du quart de réserve. L'estimation faite par deux maîtres charbonniers a révélé trois parties du canton à productivités différentes (**AMB DD112**), sans pour autant préciser la superficie de ces parties. Il est alors difficile de prendre en considération ces estimations pour la suite des calculs. En revanche, la seconde estimation réalisée le 15 janvier 1738 détermine la productivité du quart de réserve dans son ensemble

selon deux conditions d'exploitation différentes. En conservant 16 baliveaux par arpent et en exploitant les arbres fruitiers, la productivité serait de 60 cordes par arpent, équivalant à 322 stères par hectare. Si maintenant, lors de l'exploitation du canton 25 baliveaux étaient conservés et que les fruitiers n'étaient pas coupés, alors la production serait de 67 cordes par arpent, soit près de 360 stères par hectare.

Or, le mémoire, sur les entreprises faites en forêt de Chailluz, rédigé par le Grand Maître de la Maîtrise le 20 mai 1739 (**figure 2.1**) atteste que l'adjudicataire ne réalisa pas le balivage entièrement. Il permit également la coupe de chênes et de hêtres qui devaient être réservés, ainsi que la coupe des arbres fruitiers. Donc, la productivité estimée qui se rapproche le plus de celle effective est celle où les fruitiers ont été exploités et où peu de baliveaux ont été préservés, à savoir **322 stères de bois par hectare**.

2.1.3 Production de bois du quart de réserve de la forêt de Chailluz

La superficie du quart de réserve de la forêt de Chailluz a été de nombreuses fois révisée si l'on se fie aux différents plans géométriques, et procès-verbaux qui ont été dressés dans les années 1730-1740 (**table 2.2**). Au 22 mai 1739, soit à la dernière estimation faite de la superficie du quart de réserve avant la première coupe extraordinaire, la surface du canton était de 811 arpents, 88 perches, 6 pieds et 9 pouces, soit près de **414.6 hectares (figure 2.1)**. Compte tenu de la productivité retenue de ce canton de 322 stères/ha, **l'exploitation totale potentielle du quart de réserve aurait donc été de 133501 stères de bois**.

Or un procès-verbal sur la vente du quart de réserve affirme qu'au 6 janvier 1741, 253 arpents ont déjà été exploités, et qu'il restait pour 32424 livres, 19 sols et 6 deniers de bois à exploiter dans le cadre de la coupe extraordinaire (**figure 2.1**). La partie exploitée valant 55673 livres et 4 sols, l'arpent valait alors un peu plus de 220 livres et un sol. La partie qui restait à exploiter à cette date était donc d'un peu plus de 147 arpents et 35 perches, soit un total pour la coupe extraordinaire dans son entier de 400 arpents et 35 perches (204.5 hectares). Puisqu'à la quatrième année d'exploitation il ne restait plus que 5 ha à exploiter (paragraphe 2.1.1), nous pouvons considérer que la coupe dans son ensemble a bien concerné les 204.5 ha. **Cette première exploitation extraordinaire a donc fourni près de 65849 stères de bois**.

Figure 2.1 : Chronologie des événements en rapport avec la première coupe extraordinaire du quart de réserve de la forêt de Chailluz, à partir de la transcription des archives municipales de Besançon DD112, DD114 et DD115. Nos calculs sont en rouge.

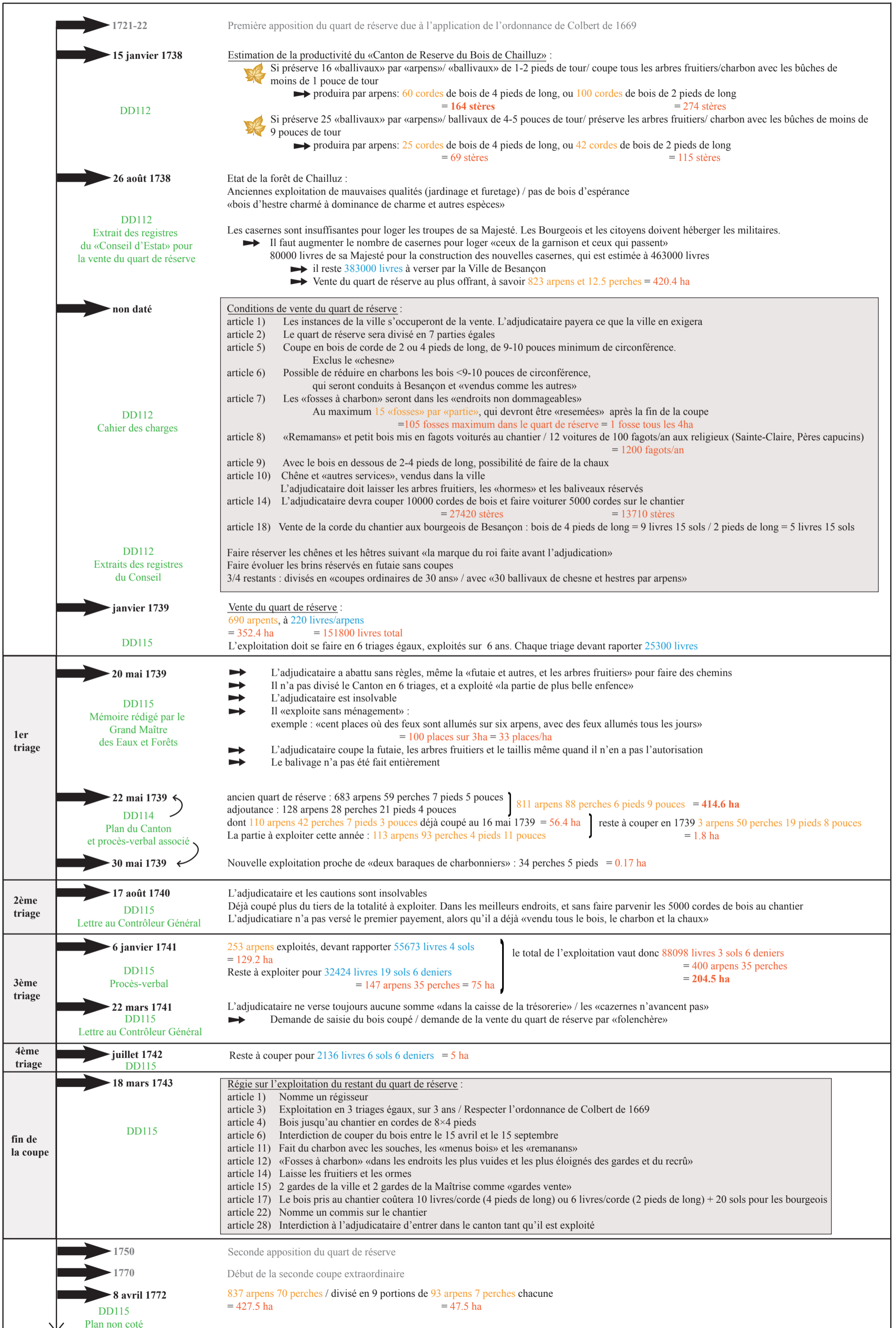


Table 2.2 : Superficie du quart de réserve de la forêt de Chailluz, et de sa part exploitée au cours du temps. Les données sont issues de notre transcription des AMB concernées.

AMB	DD112 (extrait des registres du conseil d'Etat pour la vente du quart de réserve de la forêt de Chailluz)	DD115 (Régie sur la vente du quart de réserve)	DD 115 (lettre à Monsieur le contrôleur général)	DD114 (Vc P2 40 + procès-verbal)	DD 115 (Régie sur la vente du quart de réserve)	DD115 (Régie sur la vente du quart de réserve)	DD115 (plan non coté)
date du document	26 août 1738	janvier 1739	24 janvier 1739	22 mai 1739	6 janvier 1741	juillet 1742	8 avril 1772
superficie du quart de réserve (arpent / perche / pied / pouce)	823/12//	690///		ancien quart de réserve : 683/59/7/5 adjutance : 128/28/21/4 total : 811/88/6/9			837/70//
superficie (correspondance en hectare)	420,3	352,4		total : 414,7			427,5
superficie exploitée du quart de réserve (arpent / perche / pied / pouce)			un tiers de la totalité du quart de réserve	exploité : 144/42/12/3 reste à exploiter : 3/50/19/8 total : 147/98/4/11	253///		
superficie exploitée (correspondance en hectare)				total : 75,6	129,2		
prix de revient de la vente du quart de réserve (livre / sol / denier)		220 livres/arpent, soit un total de 151800 livres			la part exploitée devait rapporter : 55673/4/ reste à exploiter pour : 32424/19/6	reste à exploiter pour : 2136/6/6	
informations complémentaires figurant sur le document	le quart de réserve sera divisé en 7 parties pour son exploitation	l'exploitation doit se faire dans 6 triages égaux	l'adjudication a été vendue pour 151800 livres				quart de réserve aposé en 1739. En 9 portions égales

2.2 Exploitation et caractérisation de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz

2.2.1 Quantification de la production de l'assiette ordinaire de Chailluz

Dans son étude sur l'approvisionnement en bois de chauffage à Besançon au XVIII^{ème} siècle, [Vion-Delphin \(1991\)](#) se base sur deux documents pour évaluer la production de bois de l'assiette annuelle de Chailluz :

Un mémoire de la fin du XVIII^{ème} siècle affirme que cette production est de 2518 cordes/an entre les années 1776 et 1783. Une enquête de l'intendance sur les bois et les usines de la province de 1783 à 1784 évalue cette production à 6480 cordes/an sur l'ensemble des forêts bisontines. Il n'a pas été possible de retrouver le mémoire du XVIII^{ème} siècle cité par Vion-Delphin. De plus, l'estimation fournie par l'enquête de l'intendance étant celle de la production des forêts bisontines de manière générale, elle reste approximative concernant la forêt de Chailluz. Ainsi, nous nous sommes basés sur l'analyse des archives traitant de l'assiette ordinaire de Chailluz pour obtenir une estimation plus précise de sa production en bois.

Les archives municipales de Besançon cotées de [DD117](#) à [DD130](#) sont des livrets d'inscription des arrêtés, ordres et procès-verbaux relatifs à l'exploitation en régie de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz. Il s'agit de procès-verbaux de reconnaissance et de livraison de bois façonnés dans cette forêt entre 1763 et 1783, donc avant et durant la seconde exploitation extraordinaire du quart de réserve. La [table 2.3](#) résume les données figurant dans ces documents et utilisées ici. La définition du bois de régal est variée selon les sources. Il peut être apparenté au bois royal ou encore au bois de souche ([Grangez, 1840](#); [Ministère des travaux publics, 1840](#); [Sergent, 1874](#)). Aucune mention n'est faite dans les archives utilisées pour cette étude concernant l'utilisation du bois de régal. En revanche, il semble se différencier du « grand bois » uniquement par sa longueur. La [figure 2.2](#) présente deux passages de texte issu de l'archive [AMB DD119](#) où cette notion est abordée. Le grand bois mesure donc 4 pieds (soit 1.3 mètre) et le bois de régal peut mesurer 2 pieds (soit 0.65 mètre) ou 8 pieds (2.6 mètres). Aucune information de longueur n'a été trouvée concernant le bois d'appellation « rondin ». En revanche, la corde de bois rondin est vendue moins cher que la corde de grand bois ou de bois régal. Dans les procès-verbaux de 1780 à 1783 ([AMB DD127](#), [DD128](#) et [DD129](#)), elle est vendue 5 sols, alors que la corde de tout bois est vendue une livre et 5 sols. On peut alors imaginer que le rondin est moins propice à la construction ou à la restauration des différents chantiers entrepris à Besançon.

La somme des trois classes de bois donne donc la production de l'assiette annuelle de la forêt de Chailluz. En moyenne, cette production est de 2061 cordes entre 1763 et 1783.

Dans un mémoire de maîtrise sur les forêts bisontines au XVIII^{ème} siècle, l'auteure avait elle aussi exploitée les données archivistiques traitant de l'assiette ordinaire de Chailluz ([Dianin, 1995, p.18](#)) ([table 2.4](#)). D'après cette source la production moyenne de l'assiette annuelle de cette forêt est de 2372 cordes. Les variations entre l'inventaire de la présente étude et celui de Dianin peuvent aisément être expliquées par le caractère textuel des archives consultées. En effet, la lecture des différents procès-verbaux a pu aboutir à des transcriptions différentes, ou encore, il est possible que certaines données chiffrées écrites en toutes lettres aient pu être omises lors de la lecture des archives. Par ailleurs, il est important de constater que son inventaire excluait les trois premières années figurant dans les procès-verbaux des archives [DD117](#) et [DD118](#), à savoir de 1763 à 1765. Or, en faisant la moyenne de production annuelle d'après notre transcription en retirant ces trois dates, le résultat est proche de celui de Dianin, à savoir 2339 cordes/an. Toutefois, cette production annuelle calculée résulte d'une

erreur volontaire de transcription, dans le sens où la valeur retenue pour les années 1768-1769 est celle pour les deux années réunies (4491 cordes), et non pas la moyenne par an (2245.5 cordes).

Dans le cadre de la présente étude, et pour la suite des calculs, nous gardons donc l'estimation de **2061 cordes de bois produites par assiette annuelle entre 1763 et 1783**, équivalent à **5651 stères par an**.

Table 2.3 : Quantités de bois produit par l'exploitation de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz, exprimées en corde de bois et en nombre de voitures transportant le bois. Les données sont issues de notre transcription des différentes AMB concernées.

exploitation de l'assiette annuelle de la forêt de Chailluz												
archives municipales de Besançon	année	cordes de grand bois	cordes de bois "régal"	cordes de rondins	total (cordes)	nombre de voitures: forêt -> chantier	nombre de voitures: chantier -> particuliers	nombre de voiture à fort griffon	nombre de voitures de bois ramassé	nombre de chêne	nombre d'orme	nombre de billot et informations complémentaires
DD 117, DD 119	1763	1259	423,5		1682,5							
DD 118, DD 119	1764	1240	122		1362							
DD 119	1765	1191,5	80		1271,5							
DD 119	1766	1108,5			1108,5							
DD 119	1767	1107,5			1107,5							
DD 119	1768-1769	4197 (2098,5)	294 (147)		4491 (2245,5)							
DD 119	1770	2424,5	240		2664,5							
DD 119	1771	2445	16		2461							
DD 119, DD 120	1772	2694			2694	3629	918					
DD 119, DD 121	1773	2296			2296							
DD 119, DD 122	1774	2573,5			2573,5							
DD 119, DD 123	1775	2446,5	24		2470,5							
DD 119, DD 124	1776	3968,5	249		4217,5							
DD 119	1777	2591			2591							
DD 119, DD 125	1778	2093			2093							
DD 126	1779	1621,5			1621,5	2987	1258					
DD 127	1780	1250,5		252,5	1503	3008	1494			102	7	
DD 128	1781	906,5		914,5	1821	3460	1653	5	15	35	29	14 billots pour chamars
DD 129	1782	993	2	720	1715	3434	1518	10		24	13	29 billots
DD 130	1783	932		789,5	1721,5	3433	1484	13		384		dont 277 chênes pour l'écluse du moulin de la ville et 62 chênes pour pilots sous la promenade de chamars

lad' foras en apres l'enumeration des cordes Nous avons
reconnu que les coupeurs y ont façonnés la quantité
de bois de corde, sous cent-soixante trois moules
de quatre pieds formant cinq cent quatrevingt une
cordes et demie de grand bois procédant
ensuite à la vérification du bois de deux
pieds appelé vulgairement Régale Nous avons

Transcription: « Nous avons reconnu que les coupeurs y ont façonnés la quantité de onze cent soixante trois moules de quatre pieds formant cinq cent quatrevingt une cordes et demie de grand bois procédant ensuite à la vérification du bois de deux pieds appelé vulgairement Régale »

Sept cent soixante et dix sept moules
reconnus qu'ils ont fabriqués cent soixante et dix sept moules
dix sept moules formant quatre vingt huit
cordes et demie de bois de quatre pieds et quatre
cordes de Régale de huit pieds de longueur

Transcription: « ... reconnus qu'ils ont fabriqués cent soixante et dix sept moules formant quatre vingt huit cordes et demie de bois de quatre pieds et quatre cordes de Régale de huit pieds de longueur »

Figure 2.2 : Transcription de deux passages de texte figurant dans les procès-verbaux relatifs à l'exploitation en régie de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz (AMB DD119), en 1771 pour le premier passage, et en

Table 2.4 : Quantités de bois flotté et de bois produit par l'exploitation de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz, exprimées en corde de bois. Les données sont issues de la transcription de Dianin (1995) des AMB DD119 à DD129 et DD143.

année	Bois de flottage (cordes)	Bois de Chailluz (cordes)
1736	1200	
1738	430	
1766	2600	1273,5
1768	1500	2399
1769	800	3169
1770	800 à 900	2680
1771	300	2452,5
1772	1200	2694
1773	7000	2296
1774	4300	2673,5
1775	13400	2560
1776	14600	4221
1777	7400	2491
1778	12800	2093
1779	8500	1471,5
1780	17700	1984,5
1781	14700	1786,5
1782	9700	1713
1784	8900	
1785	12100	
1786	13613	
1787	29100	
1788	20100	
1789	17980	
1790	9300	
moyenne	9202,92	2372,375

2.2.2 Productivité de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz

Les transcriptions des fonds archivistiques sur la superficie de l'assiette ordinaire au moment de la première coupe extraordinaire du quart de réserve ont donné des résultats divergents du simple au double, selon le transcripteur.

Dans le mémoire du XVIII^{ème} siècle cité par Vion-Delphin, l'auteur estime approximativement la superficie de l'assiette ordinaire de Chailluz à 100 arpents. Vion-Delphin révisa cette estimation par l'analyse du document **AMB DD113**, comportant des informations sur la juridiction et l'administration de la forêt par la ville de Besançon de 1737 à 1779. L'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz aurait été de 162 arpents, d'après sa transcription, soit 82.7 ha. Par ailleurs, au cours de sa thèse, Catherine Fruchart a réalisé une analyse considérable des plans géométriques de la forêt de Chailluz, notamment le plan **AMB Yc M1 45**, datant de 1738 et le plan **AMB Yc M1 46**, non daté. D'après son analyse et sa transcription du texte figurant sur ces deux documents, l'assiette ordinaire de la forêt était de 83 arpents et 70 perches, soit 43 ha (Fruchart, 2014). Considérant que ces plans sont d'une précision évidente, Fruchart estime que cette valeur est sûre.

Par ailleurs, en résumant les différentes superficies transcrites du quart de réserve, de l'assiette ordinaire et de la forêt de Chailluz de manière générale, il apparaît que l'assiette ordinaire devait se rapprocher davantage de l'estimation faite dans les archives consultées par Catherine Fruchart. En effet, la surface de la forêt de Chailluz ayant peu variée au cours du XVIII^{ème} siècle, entre 1625 et 1675 ha (paragraphe 1.2.6.4 **chapitre 1**), alors l'addition des surfaces du quart de réserve et des assiettes ordinaires devait logiquement se rapprocher de ces valeurs. Or, pour une superficie du quart de réserve retenue à 414.6 ha en 1739 (paragraphe 2.1.3), une assiette ordinaire de 42.7 ha (Fruchart) donnerait une surface totale de la forêt de Chailluz de 1695.6 ha. Tandis qu'une assiette ordinaire de 82.7 ha donnerait une surface totale de Chailluz de 2895.6 ha (Vion-Delphin), soit plus du double de ce que Chailluz devait mesurer.

Pour la suite de ce chapitre nous retiendrons donc une **superficie de l'assiette ordinaire durant le XVIII^{ème} siècle de 83 arpents et 70 perches, soit 42.7ha.**

Connaissant alors la superficie de l'assiette ordinaire de Chailluz, ainsi que la quantité de bois produite par assiette, il est alors possible de calculer le rendement de bois de cette forêt. D'après nos calculs il est d'un peu plus de **132 stères/ha au moins durant la seconde coupe extraordinaire**. Ce rendement s'accorde avec celui calculé à partir des informations fournies dans le mémoire du XVIII^{ème} siècle cité par Vion-Delphin. Dans ce mémoire, la production de bois de l'assiette ordinaire était de 25 cordes/arpent, ce qui représente 134 stères/ha.

2.2.3 Révolution des coupes ordinaires de la forêt de Chailluz, et type de peuplement présent

Les archives semblent fournir des informations divergentes concernant la révolution des coupes ordinaires de la forêt de Chailluz. D'après la transcription de Vion-Delphin (1991) de l'archive **AMB DD113**, l'assiette ordinaire était composée d'un taillis de 25 ans de 1737 à 1779. Or d'après la lecture de Catherine Fruchart de deux plans anciens de 1738 (**AMB Yc M1 45** et **46**), et notre transcription du cahier des charges traitant de la première coupe extraordinaire (**figure 2.1**), le parcellaire de la forêt de Chailluz **était composé d'un quart de réserve et de 30 assiettes ordinaires de 30 ans de révolution.**

L'agenda du forestier de 1900 (*Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1900*) présente deux tables différentes de production d'un taillis-sous-futaie, exprimées en stère/ha et définies selon l'âge du peuplement forestier présent (**figure 2.3**). La table de production établie par Mathey est définie selon le substrat de la station, et la table de production de Noirot-Bonnet est établie selon la fertilité du sol et l'assemblage taxonomique du peuplement. D'après la classification de Mathey, le type Gp5 correspondant aux calcaires marneux s'apparente le plus aux conditions actuelles de station de la forêt de Chailluz. Dans le cas de la classification de Noirot-Bonnet, cette forêt correspondrait d'avantage au type CI5, apparenté à un terrain médiocre où le charme, l'alisier et l'érable seraient les plus à même de se développer.

Ainsi, le rendement de la coupe annuelle de Chailluz, défini dans le paragraphe ci-dessus (132 stères/ha), l'âge du peuplement présent (30ans) et le type de substrat présent en forêt de Chailluz (Gp5) sont des indices de présence **dans les assiettes ordinaires du XVIII^{ème} siècle d'un TSF, où le taillis était coupé tous les 30 ans**. En allant plus loin, la transcription du cahier des charges de la première coupe extraordinaire, révèle la volonté de préserver dans l'assiette ordinaire, « 30 baliveaux de l'âge du taillis par arpent ». Ce qui correspond à laisser **2513 baliveaux par assiette**.

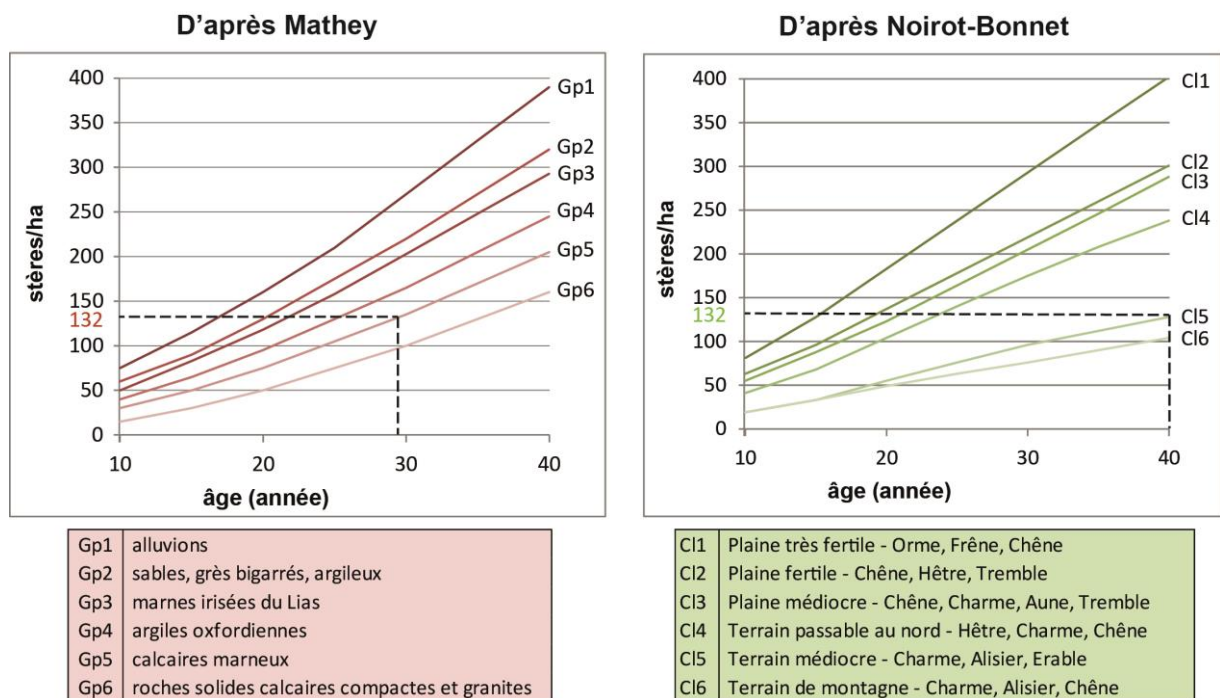


Figure 2.3 : Représentations graphiques de la table de production d'un taillis-sous-futaie établie par Mathey, et de celle établie par Noirot-Bonnet, présentées dans l'agenda du forestier pour 1900 (*Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1900*).

3. Usages du bois produit en forêt de Chailluz

La quantification faite précédemment des stocks de bois sortant de l'assiette ordinaire et du quart de réserve permettrait de discuter de la part utilisée par les trois principaux consommateurs de bois, à savoir, l'industrie métallurgique, les habitants de Besançon pour leur chauffage, et la ville pour le bois d'œuvre.

Cette partie développe les calculs réalisés de la consommation de bois et de charbon de bois par les deux premiers consommateurs. La production de bois d'œuvre est ici qu'évoquée, puisqu'elle nécessiterait une étude à part entière, trop développée pour être menée dans le temps imparti de ce travail.

3.1 Bois de chauffage des bisontins aux XVIII^{ème} – XIX^{ème} siècles

3.1.1 Les besoins en bois de chauffage à Besançon au XVIII^{ème} siècle

En raison du rattachement de la Franche-Comté au Royaume de France, Besançon devint la capitale provinciale de la région, aboutissant à une forte hausse démographique et à une augmentation du confort de vie. De 1688 à 1791, la ville passa de 14209 habitants à 32180 habitants, ayant pour conséquence une augmentation considérable des besoins en bois de chauffage (Vion-Delphin, 1991). Selon une enquête de l'intendant transcrite par Vion-Delphin, la consommation de bois par foyer resta constante au cours du XVIII^{ème} siècle, à raison de 6 cordes par feu. D'après lui, la consommation en bois de chauffage de Besançon passa de 24180 cordes, soit 66301 stères en 1709 à **46740 cordes, soit 128161 stères en 1791**. Or d'après Dianin (1995), cette consommation a augmenté au cours du siècle, commençant à 5 cordes par feu, puis à 6 cordes. La consommation de bois de chauffage bisontin aurait ainsi été que de **20150 cordes, soit 55251 stères en 1709**. Pour l'année 1791, son estimation est similaire à celle de Vion-Delphin. Compte tenu de l'augmentation du confort de vie au cours de ce siècle, il nous paraît probable que la consommation de bois de chauffage par foyer ait augmenté en conséquence. Pour la suite de cette partie nous retiendrons donc les données de Dianin.

3.1.2 Bois de chauffage provenant de la forêt de Chailluz

Nous nous proposons ici de quantifier le bois de chauffage provenant de la forêt de Chailluz au XIX^{ème} siècle, et de comprendre son acheminement. Ceci dans l'optique d'identifier l'impact de ce besoin en combustible sur la gestion sylvicole de cette forêt, et de caractériser de manière générale, l'approvisionnement en bois de chauffage de la ville.

3.1.2.1 Quantité de bois acheté par les bisontins à la fin du XIX^{ème} siècle

A notre connaissance, aucune donnée chiffrée concernant la production de bois de chauffage en forêt de Chailluz au XVIII^{ème} siècle n'est fournie par les sources archivistiques ou littéraires de la région. Seule, l'**AMB 2N9** fournit des indications quantitatives sur cette production, mais elle concerne le XIX^{ème} siècle. Il serait alors intéressant de mener une recherche archivistique plus poussée que celle entreprise pour cette thèse, pour tenter de retrouver des registres de compte de la vente de charbonnette au XVIII^{ème}, dans le but de pouvoir comparer les consommations et productions de bois citées dans ce chapitre.

L'**AMB 2N9** est le registre de compte de la vente de charbonnette issue de la forêt de Chailluz de 1882 à 1886 aux habitants de Besançon. Ce registre fait mention de la date de vente, du nom de l'habitant à qui a été vendue la charbonnette, ainsi que le nombre de stère qui lui a été vendu et la somme versée pour ce stock de bois. Il semblerait que l'année 1886 soit incomplète compte tenu du nombre de foyer pour cette année qui est deux fois moins important que pour les années précédentes (**table 2.5**). Qui plus est, le registre pour l'année 1886 s'arrête en bas de la dernière page disponible, sans notation de la somme totale de stères

vendus, alors qu'elle est notée systématiquement pour les années précédentes. **La moyenne calculée entre 1881 et 1885 est de 2929 stères de charbonnette vendus par année.**

Toute la question est de comprendre ce qui est sous-entendu par l'emploi du mot « charbonnette ». Le registre est assez sommaire concernant cette information, puisque seul le titre de cette archive fait mention de ce mot : « Registre de la charbonnette de la forêt de Chailluz ». Toutefois, de manière traditionnelle, la charbonnette désigne le bois destiné à être réduit en charbon. De plus, nous partons de l'hypothèse que s'il s'agissait de la vente de charbon de bois, alors le registre s'intitulerait « Registre du charbon de la forêt de Chailluz ». Nous considérerons donc par la suite que la vente des charbonnettes aux habitants était sous forme de bois et non de charbon de bois.

Considérant que la vente d'une année correspond à la vente de charbonnette issue de l'assiette ordinaire coupée l'année précédente, comme il est possible de le transcrire du registre, alors **plus de la moitié du bois coupé par assiette ordinaire est vendue en charbonnettes aux habitants de Besançon** (paragraphe 2.2 : 5651 stères produits par assiette à la fin du XVIII^{ème} siècle). De plus, il apparaît que la charbonnette issue de Chailluz ne représente que **2.3 %** de la consommation de bois de chauffage de Besançon (paragraphe 3.1.1 : 128161 stères à la fin du XVIII^{ème} siècle).

Ces déductions paraissent cohérentes avec les données fournies par **Vion-Delphin (1991)** concernant les bois affectés au chauffage de Besançon pour l'année 1751. D'après lui, plus de **90%** de la consommation bisontine en bois de chauffage provenait de bois de la maîtrise de Besançon et de Baume par flottage, et donc seulement **10%** proviendrait des 5 forêts bisontines, dont Chailluz. De plus, les données fournies par l'enquête de l'Intendance de 1783 à 1784 concordent également avec les estimations de François Vion-Delphin. En effet, d'après cette enquête, 6480 cordes, soit 17768 stères provenant des assiettes ordinaires des 5 forêts bisontines seraient consommées par an par les bisontins. Ce qui représente 14% du bois de chauffage bisontin consommé en 1791. Ce qui veut dire que **11.7%** de la consommation de bois de chauffage des bisontins provenait des 4 autres forêts bisontines, et **86%** d'autres forêts.

Toutefois, nos pourcentages calculés sont à interpréter avec précaution puisque plus de 100 ans séparent les sources archivistiques utilisées dans les calculs. Nous verrons d'ailleurs par la suite (paragraphe 3.1.3.3) que ces pourcentages sont incohérents avec ceux de la consommation bisontine de bois d'autres forêts à la fin du XVIII^{ème} siècle.

Table 2.5 : Vente de la charbonnette aux bisontins de 1881 à 1886. Les données sont issues de notre transcription de l'AMB 2N9.

année	charbonnette vendue (stère)	nombre d'habitants ayant acheté la charbonnette
1881	2520	402
1882	2778	474
1883	3153	421
1884	3186	503
1885	3010	510
1886	2025	275
MOYENNE :	2929,4	462

3.1.2.2 Acheminement de la charbonnette vendue aux bisontins

Les archives traitant de l'exploitation de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz entre les années 1763 et 1783 (AMB DD117 à DD130) font mention de voiture de bois acheminées du chantier, sous-entendu le chantier de Battant (figure 2.4), aux habitants de Besançon (table 2.2). Toute une série de questions peut alors être soulevée ici.

⇒ Pourquoi ne pas acheminer le bois aux habitants directement de la forêt de Chailluz, plutôt que de passer par le chantier ?

On peut noter que le nombre de voitures arrivant au chantier est au moins deux fois plus important que le nombre de voitures qui en part pour être acheminées aux habitants. De cette remarque on peut supposer **qu'une sélection des meilleurs bois est faite pour la construction des casernes directement sur le chantier. Le stock restant peut avoir été distribué aux habitants.** Cette hypothèse semble probable puisque le commis du chantier de par sa fonction paraît être le plus à même d'évaluer la qualité des bois qu'il souhaite utiliser sur le chantier.

⇒ Le bois acheminé aux habitants par voitures est-il le même que celui vendu en charbonnette répertorié dans le registre de compte AMB 2N9 ?

Rien n'indique dans cette archive le lieu de vente de la charbonnette. De même, les archives énumérant les voitures partant du chantier aux habitants ne mentionnent pas le lieu de vente du bois. Il paraît tout à fait acceptable de penser que **le bois était acheminé du chantier à un endroit unique, où la vente aux habitants était réalisée sur quelques jours**, comme on peut le transcrire de l'archive 2N9, et où chaque transaction était répertoriée dans un registre de compte. Une recherche archivistique plus avancée pourrait permettre d'éclaircir ce point.

⇒ Sous quelle forme les habitants consommaient-ils la charbonnette, charbon ou bois ?

Comme nous avons pu le démontrer précédemment le registre de compte AMB 2N9 indique que la charbonnette est vendue sous forme de bois aux habitants. Or, par définition, la charbonnette est destinée d'après la tradition charbonnière à être transformée en charbon.

Alors bien qu'utiliser le charbon de bois comme combustible pour le chauffage ait de nombreux avantages par rapport au bois (meilleur pouvoir calorifique, meilleur rendement et combustion plus facile à maîtriser), il semble peu logique que le bois de chauffage ait été sorti de la forêt sous sa forme initiale pour être vendu aux habitants, qui ensuite l'emmenèrent à nouveau en forêt pour le réduire en charbon. Cela semble d'autant moins logique que pour monter sa charbonnière, le charbonnier récolte le bois dans les alentours proches de la plateforme pour limiter au maximum le transport de grandes quantités de bois (Battesti, 1992; Rouaud, 2013).

Il nous semble alors raisonnable de penser que le combustible employé par les habitants pour leur chauffage était sous forme de bois et non pas de charbon. Le terme « charbonnette » employé dans le registre de compte de la vente des charbonnettes aux habitants de Besançon, désignerait donc en réalité le bois de chauffage, sans pour autant qu'il soit destiné à être réduit en charbon. Dans ce cas, il semble que **les plateformes de charbonnage de Chailluz n'aient peut-être pas été utilisées pour le chauffage des bisontins**. Par la suite, nous nous baserons sur cette hypothèse.

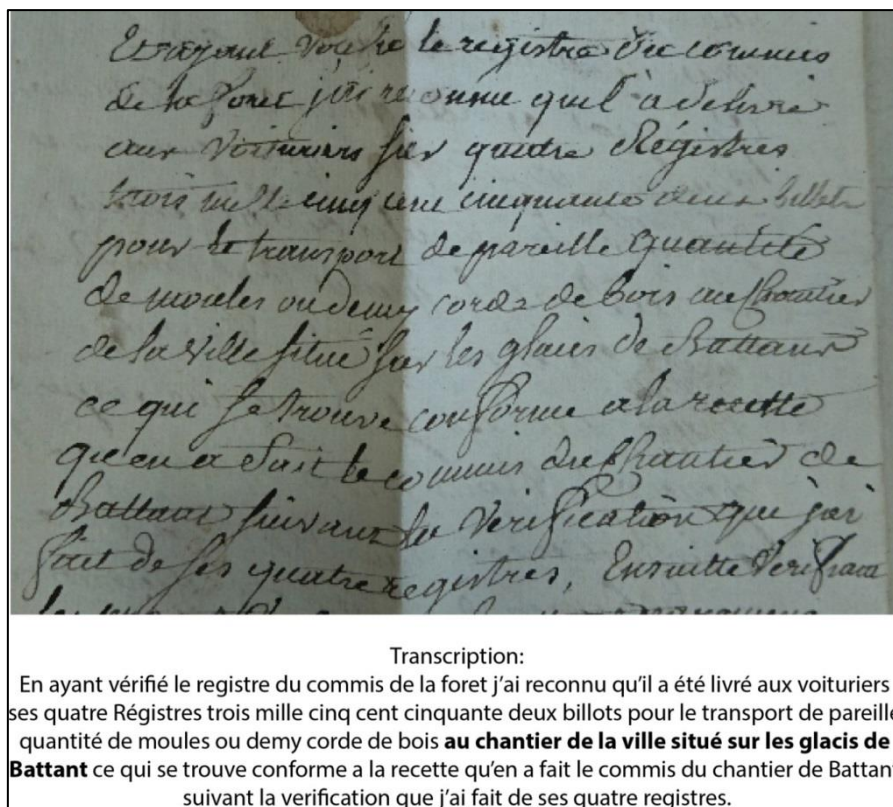


Figure 2.4 : Passage de texte de l'AMB DD128, datant de 1781, et sa transcription.

3.1.3 Flottage du bois de chauffage de Besançon au XVIII^{ème} siècle

Vion-Delphin (1991) a réalisé un travail significatif sur l'approvisionnement en bois de chauffage de la ville de Besançon au XVIII^{ème} siècle, et en particulier sur l'approvisionnement en bois de chauffage flotté. Ce paragraphe n'a pas pour vocation de résumer l'ensemble de ses travaux, mais plutôt de s'appuyer sur certains faits qu'il évoque pour enrichir nos calculs.

Pour répondre aux besoins grandissant en bois de chauffage de Besançon, les seules forêts bisontines ne suffirent plus, il fut alors nécessaire de faire venir le bois de l'extérieur. Le transport de si grosses quantités de bois n'était pas envisageable par charrois, notamment en raison du mauvais état des chemins. En revanche, la position géographique de Besançon, a permis de trouver une solution imparfaite mais la seule envisageable : le flottage du bois sur le Doubs.

3.1.3.1 Affectation de forêts extérieures pour le bois de chauffage de Besançon

Dans un arrêt de 1726, le magistrat de la ville affecte au bois de chauffage de Besançon des bois de 50 communautés villageoises en amont de la ville et de deux affluents, la Barbèche et le Dessoubre. Les lettres patentes du 17 octobre 1735 règlent cette affectation forestière en ordonnant de faire aménager le port de Rivotte pour la réception des bois flottés (**figure 2.5**), et d'augmenter à une lieue autour du Doubs et de ses affluents les forêts affectées au bois de chauffage de Besançon. Un état de 1751 fait mention des communautés villageoises affectées. Elles sont au nombre de 244 de la maîtrise de Besançon (19), de Baume (225), plus certaines forêts royales. L'ensemble représente 71351 arpents et 90 perches et demi, soit 36439 hectares de forêt (**figure 2.6**).

D'après une enquête de 1783-1784 et des plans levés des forêts concernées, la production théorique de cet ensemble serait de 89302 cordes, soit 244866 stères (Vion-Delphin, 1991). Dans la réalité, la production de bois de chauffage de Besançon amenée par ces forêts est bien moindre pour de multiples raisons. La première est que ces forêts présentaient des surfaces forestières avec un état dégradé avancé rendant incapable de produire le bois de chauffage. La seconde raison est que ces forêts devaient également fournir le bois de chauffage des communautés affectées, abaissant ainsi la production de bois de chauffage de Besançon à **42932 cordes, soit 117719 stères, ce qui représente 48% de la production potentielle de ces forêts** (Vion-Delphin, 1991). Cette production semble suffisante au regard de la consommation estimée des bisontins en 1791 (paragraphe 3.1.1 : 128161 stères). Mais c'était sans compter sur des difficultés persistantes qui firent que les quantités de bois arrivées par flottage au port de Rivotte étaient en réalité bien moindres.

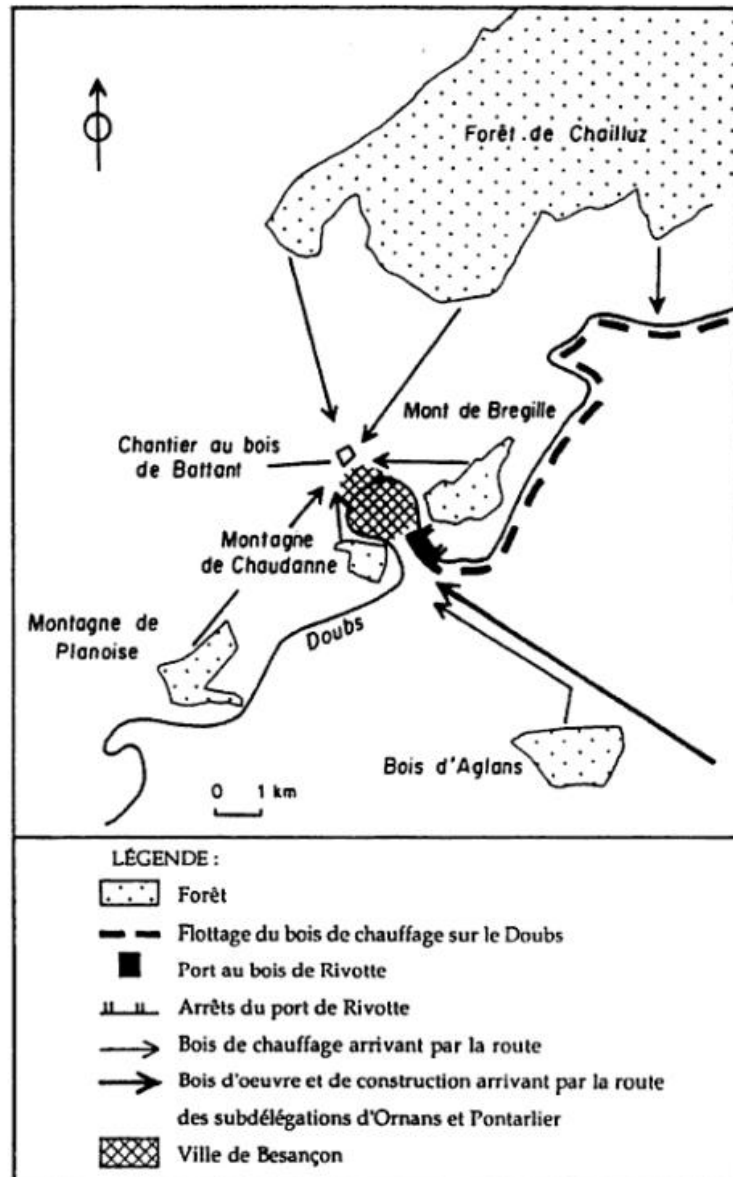


Figure 2.5 : Approvisionnement de Besançon en bois de chauffage au XVIIIème siècle (Vion-Delphin, 1991). Mise en évidence du bois de chauffage acheminée par flottage sur le Doubs.

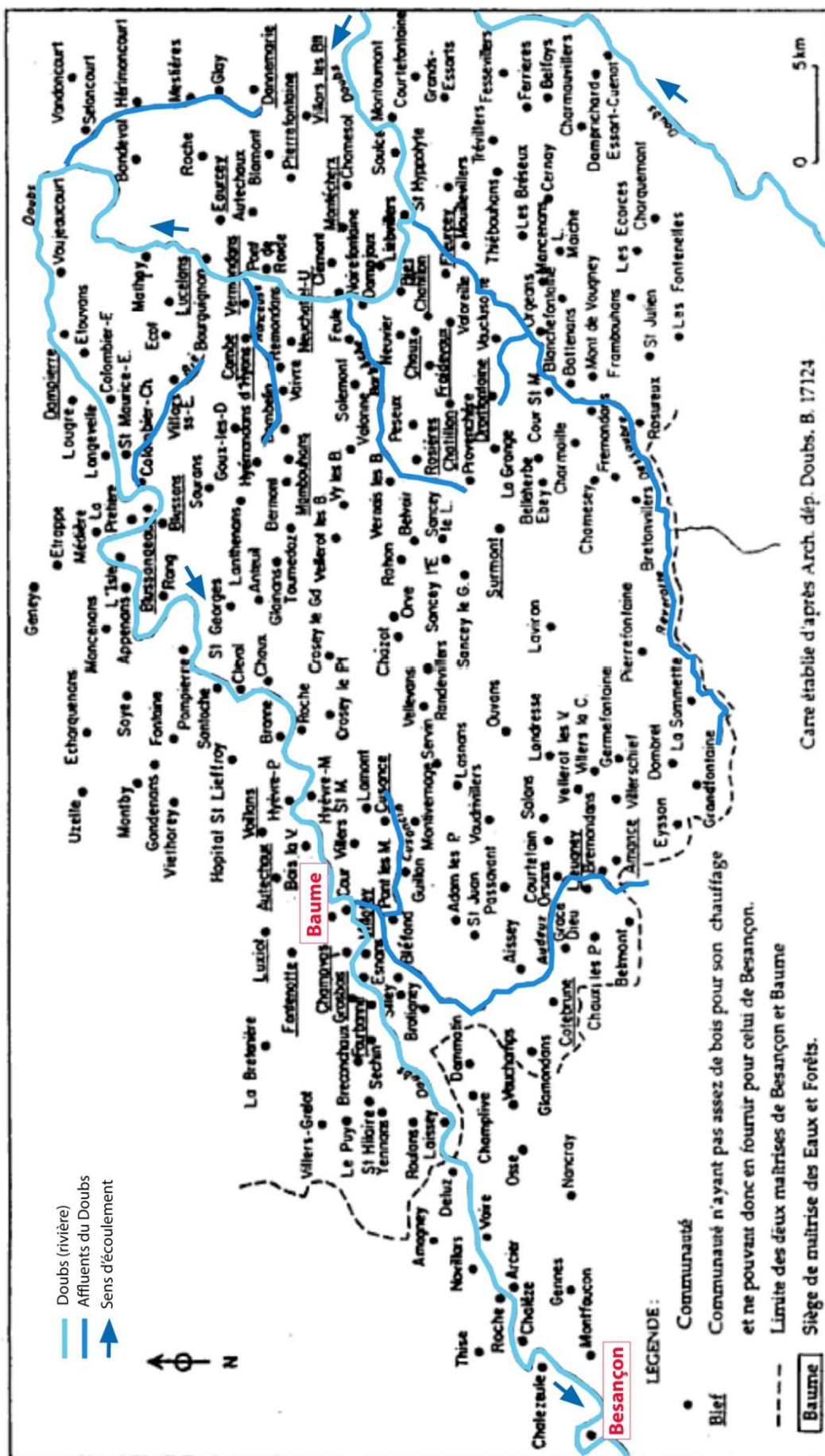


Figure 2.6: Communautés affectées au chauffage de Besançon, d'après les lettres patentes du 17 octobre 1735 (Vion-Delphin, 1991, modifié).

3.1.3.2 Les difficultés d'approvisionnement en bois de flottage

Le Doubs étant une rivière jeune et à forte pente, le cours est très perturbé et les crues y sont dangereuses. Il est alors très difficile de franchir les rapides à basses eaux, limitant les moments du flottage de février à mai et de novembre à décembre. De plus le Doubs était parsemé de moulins, de scieries et de multiples autres usines. Au milieu du XVIII^{ème} siècle, pas moins de 38 écluses séparent Besançon d'Audincourt. S'ajoutent à ces difficultés, les vols de bois par les particuliers et même par les forges et autres usines. De 1768 à 1785, des poursuites ont été engagées contre des marchands de bois qui firent du charbon pour les forges avec du bois affecté au chauffage de la ville. Dans une lettre destinée au magistrat de la ville datée du 26 août 1768, le Grand Maître constate que nombre d'adjudicataires des forêts affectées au bois de chauffage de Besançon, détournent les bois pour les vendre au détail ou pour en faire du charbon. Dernier fait défavorisant l'approvisionnement en bois de chauffage de la ville, l'ordonnance de Colbert de 1669 n'a pas été appliquée instantanément sur les forêts, et encore moins sur les forêts affectées. Il a fallu attendre plus de 20 ans après les lettres patentes de 1735 pour que toutes les communautés de la maîtrise de Baume affectées au bois de chauffage de Besançon soient mises en règle.

Au regard de l'ensemble de ces difficultés d'acheminement du bois de chauffage de Besançon, et n'ayant pas de données chiffrées sur le bois réellement arrivé au port de Rivotte, [Vion-Delphin \(1991\)](#) n'a pu que supposer que les besoins en bois de chauffage restèrent plus forts que ce que les forêts affectées ne fournissaient.

3.1.3.3 Quantité de bois de chauffage de Besançon provenant par flottage sur le Doubs

Toutefois, [Dianin \(1995\)](#) a réalisé un inventaire des quantités de bois arrivé par flottage au port de Rivotte de 1736 à 1790, par transcription de l'[AMB DD143 \(table 2.4\)](#). Dans un premier temps, il est intéressant de remarquer que les quantités de bois arrivées par flottage ont doublé, voire triplé des années 1730 au milieu des années 1770, révélant sans doute la difficulté du magistrat de la ville à faire respecter les lettres patentes de 1735 sur cette période. En faisant abstraction de ce début difficile, cet inventaire fait état d'un peu moins de **13993 cordes, soit 38369 stères de bois de flottage par an arrivés au port de Rivotte entre les années 1775 et 1790**, ce qui représente moins d'un tiers de ce que Vion-Delphin avait estimé en excluant toutes les difficultés rencontrées pour le flottage des bois (paragraphe 3.1.3.1). On peut alors supposer que le vol, le non-respect des lettres patentes de 1735 et toutes les autres contraintes de la pratique sont responsables de la faible quantité de bois de chauffage arrivée à la ville, à hauteur de deux tiers de la quantité théorique dédiée au chauffage de Besançon.

Ainsi, en 1791, le bois arrivé par flottage ne représente que 30% de la consommation bisontine de bois de chauffage (paragraphe 3.1.1 : 128161 stères). Cette estimation pose quelques difficultés pour l'interprétation des provenances du bois de chauffage de Besançon. En effet, ayant estimé que 2% de ce bois de chauffage provenait de la forêt de Chailluz (paragraphe 3.1.2.1), alors comment expliquer les 68% restants ? Les autres forêts bisontines qui seraient également susceptibles de fournir du bois de chauffage à Besançon, ne sont pas suffisamment vastes pour expliquer ce pourcentage, représentant que 350 ha total ([chapitre 1](#), paragraphe 1.2). La seule explication actuellement possible, consisterait à dire que la consommation de charbonnettes issues de la forêt de Chailluz a fortement varié entre le XVIII^{ème} et le XIX^{ème} siècle. Ce qui ne nous permet pas de généraliser la valeur de 2929 stères consommés par an durant les deux siècles, calculée à partir du registre de l'[AMB 2N9](#) datant

de 1882-1885. Dans ces conditions, nous sommes seulement à même de dire **qu'à la fin du XVIII^{ème} siècle, 30% de la consommation bisontine de bois de chauffage provient par flottage sur le Doubs de forêts extérieures à la ville, et la part restante provient des forêts bisontines.**

Force est de constater que les sources chiffrées manquent, pour être rigoureux, dans l'interprétation des données du bois de chauffage bisontin. Une recherche archivistique plus poussée pourrait aider à préciser ces chiffres, notamment en fournissant des informations sur le bois de chauffage provenant de Chailluz au XVIII^{ème} siècle. De plus, les **AMB DD138 à DD154** et **DD193** concernent justement le bois flotté sur le Doubs pour le chauffage de Besançon (**annexe 3**). Il serait intéressant de commencer la recherche par ces archives pour conforter notre estimation.

3.2 Consommation du bois issu de la forêt de Chailluz par l'industrie métallurgique

3.2.1 Introduction

3.2.1.1 La métallurgie et le bois

De tout temps et particulièrement depuis l'apparition du haut-fourneau au début du XV^{ème} siècle, la métallurgie était grande consommatrice de bois, impactant considérablement le couvert forestier (Dornic and Grégoire, 1984; Woronoff, 1990, 1984). Cette consommation était telle qu'en 1826 un quart de la forêt française était décimé par les forges (Noirot, 1843). Pour pourvoir à ce fort besoin en bois, nombre de forêts étaient exclusivement à vocation métallurgique. Quelques travaux de recherche traitant de ce sujet parlent même de « forêts métallurgiques » (Bechmann, 1984; Houzard, 1980; Paradis-Grenouillet, 2012; Rouaud, 2013).

Quelle que soit la métallurgie employée, le combustible utilisé pour la réduction du minerai et pour le travail du métal était le charbon de bois, jusqu'à sa substitution par le charbon de terre vers 1830 (Andrieux et al., 1988; Arnould, 1978; Dornic and Grégoire, 1984; Woronoff, 1990). En effet, le charbon de bois ayant un pouvoir calorifique plus élevé que celui du bois, il est préféré en métallurgie, en particulier depuis l'apparition de l'affinage, durant laquelle les températures de fusion des métaux doivent être atteintes.

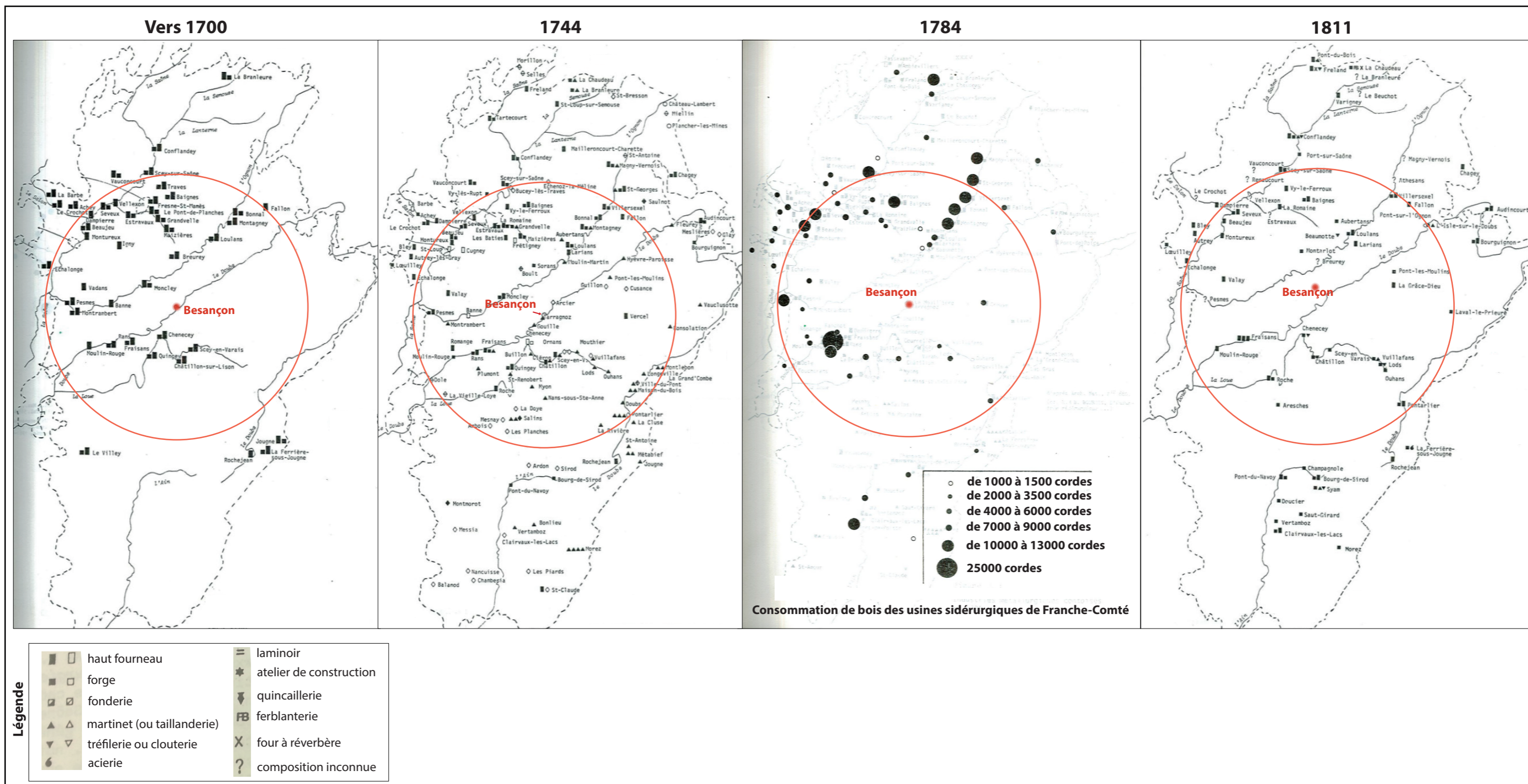
3.2.1.2 Histoire de la métallurgie franc-comtoise

La métallurgie, et plus particulièrement la sidérurgie prirent une place importante en Franche-Comté depuis au moins la période de Hallstatt, en raison de la localisation de cette région sur des axes principaux d'échange commerciaux, et de la présence significative de minerai de fer dans le sous-sol (Fiétier and BreLOT, 1977; Jacob and Mangin, 1990; Leroy et al., 2000). Une métallurgie monastique a été attestée par des indices archéologiques au V^{ème} siècle, dans le sud de la Franche-Comté. Cette production semblait avoir une portée plus locale qu'à plus grande échelle. Dans le nord-ouest comtois, le district de Berthelange est un site important pour la production de fer au Haut Moyen-Âge (Forlin and Laurent, 2014). Aucune autre étude n'a à notre connaissance portée sur la métallurgie franc-comtoise avant l'époque moderne. Par ailleurs, les cartulaires des abbayes de la région attestent d'une sidérurgie active dès le XIII^{ème} siècle, malgré la Guerre de 30 ans qui entraîna une baisse considérable de la démographie franc-comtoise. La métallurgie comtoise moderne a été rondement étudiée par François Lassus au cours de sa thèse de doctorat en 1968 (Lassus, 1968). L'histoire de la sidérurgie moderne commence au XV^{ème} siècle avec l'apparition des Hauts-Fourneaux (soufflerie hydraulique) qui remplacèrent progressivement les Bas-Fourneaux (soufflerie naturelle). Mais en Franche-Comté, le passage à la fonte se fera seulement à la fin du siècle (Lassus, 1968). Dès cette période, la sidérurgie à l'ouest de Besançon est dédiée principalement aux salines de Salin pour la construction de leurs chaudières (Chomel and Ebersolt, 1951). Sur l'ensemble de la région, l'activité métallurgique augmenta régulièrement au cours du XVIII^{ème} siècle, aboutissant en 1789 au classement de la région parmi les deux provinces françaises les plus productives en fonte et en fer, derrière la Champagne. A cette date la Franche-Comté fabriquait près de 17% de la fonte et 15% du fer élaboré du royaume (Bourgin and Bourgin, 1920). D'ailleurs, en 1784, les forges comtoises absorbaient 40% de la consommation de bois de la région. L'apogée de la sidérurgie comtoise perdura jusqu'au milieu du XIX^{ème} siècle. Le fer était alors utilisé pour la fabrication d'objets divers, de boulets et de bombes, ainsi que par les tréfileries (fil de fer) et les pièces

d'horlogerie qui firent la renommée de la Franche-Comté (Lassus, 1968). Toutefois, la pénurie de bois qui sévissait dans la région, et qui rendit difficile l'approvisionnement en bois de chauffage des bisontins, ainsi que le vol attesté de bois flotté par les forges (Vion-Delphin, 1991) eut de lourdes répercussions sur l'industrie métallurgique. Le magistrat de la ville s'opposa à l'installation de nouvelles usines métallurgiques sur le territoire bisontin dès 1726, ce qui entraîna un vide industriel autour de Besançon, notable à partir du milieu du XVIII^{ème} siècle (Lassus, 1968). Cette singularité est visible sur la **figure 2.7** représentant les établissements sidérurgiques présents en Franche-Comté de 1700 à 1811.

Compte tenu de la forte consommation de charbon de bois par la métallurgie de manière générale et de la présence importante de plateformes de charbonnage à Chailluz, nous sommes en droit de nous demander si le charbonnage en forêt de Chailluz était destiné entièrement ou pour partie à l'industrie métallurgique comtoise. Pour répondre à cette question, il est d'abord nécessaire de quantifier la production des charbonnières franc-comtoises, puis la consommation de charbon de bois des usines, forges et fourneaux susceptibles d'utiliser le combustible produit à Chailluz. La comparaison de ces deux données pourra alors permettre de déterminer si Chailluz était capable de pourvoir aux besoins en combustible de la métallurgie franc-comtoise.

figure 2.7 : Les usines métallurgiques comtoises des XVIIIème et début XIXème siècles (Lassus, 1968). Les cercles rouges délimitent une aire de 50 km autour de Besançon.



3.2.2 Quantification de la production des charbonnières franc-comtoises

3.2.2.1 Rendement des charbonnières franc-comtoises

Le rendement d'une charbonnière a été le sujet d'étude de nombreux travaux de différentes régions de France, mais également de Belgique. Toutefois puisque le rendement d'une charbonnière dépend en grande partie des pratiques de montage de la meule, qui diffèrent selon les traditions locales, nous n'avons pas pris ces données comme référence. C'est pourquoi nous avons calculé le rendement d'une charbonnière expérimentale réalisée en suivant une tradition franc-comtoise, conduite par un charbonnier de la forêt de Chaux (forêt jurassienne à une cinquantaine de kilomètres à l'ouest de Besançon).

3.2.2.1.1 Matériel et méthodes

Pour la construction de la meule expérimentale, 1.7 stère de bois « frais » était à disposition, soit 528 kg composé de 74% de charme (*Carpinus betulus*), 25% de hêtre (*Fagus sylvatica*), et 1% de bouleau (*Betula sp.*), de chêne (*Quercus sp.*) et de pin (*Pinus sp.*). Les 374 charbonnettes mesuraient 50 cm de long (de 50 à 100 cm dans la littérature, selon la région : Hardy and Dufey, 2012; Paradis-Grenouillet, 2012; Rouaud, 2013) pour un diamètre moyen de 6.6 cm (de 5 à 10 cm dans la littérature : A. F. Malepeyre, 1836; Duhamel de Monceau, 1774) (Figure 2.8A).

La meule fut construite sur 2 étages de charbonnettes et comprenait une cheminée centrale (figure 2.8B-C). L'édifice fut recouvert de feuilles et d'argile provenant de l'environnement avoisinant le site (Figure 2.8D). La carbonisation s'est déroulée sur 21h et a dû être malheureusement stoppée en aspergeant les charbons d'eau pour éviter une combustion trop avancée des bois.

Dans ces conditions, l'humidité des incuits (bois non carbonisés) et des charbons récupérés était un paramètre pesant sur le calcul du rendement. C'est pourquoi, le taux moyen d'humidité des charbons de bois et celui des incuits ont été calculés et pris en compte dans l'estimation du rendement de la charbonnière. Pour ce faire 10 incuits et 9 charbons de bois ont été pesés puis séchés, à l'étuve à 45°C dans le cas des incuits et à l'air ambiant pour les charbons. Le séchage a été estimé comme étant suffisant et donnant des valeurs significatives lorsque la masse des échantillons était stabilisée dans le temps (figure 2.9).

Nous précisons que pour le calcul du rendement la masse volumique du charbon a été estimée en moyennant celles fournies par deux sources différentes. Nous avons donc retenu une masse volumique de 235 kg/m³ (150-300 kg/m³: FAO, 1984; 240-320 kg/m³: Hardy and Dufey, 2012a). De plus, nous parlerons de charbons « humides » lorsque nous ferons référence aux charbons directement sortis de la charbonnière, et de charbons « secs » en référence aux charbons issus de la charbonnières et séchés à l'air ambiant. Il en va de même avec les incuits : incuits « humides » pour les incuits issus de la charbonnière, et incuits « secs » pour les incuits séchés à l'étuve. Nous parlerons également de bois « frais » lorsque nous ferons référence au bois directement utilisé pour la meule, et de bois « sec » en référence au bois « frais » duquel a été retranché le taux d'humidité calculé sur les incuits.

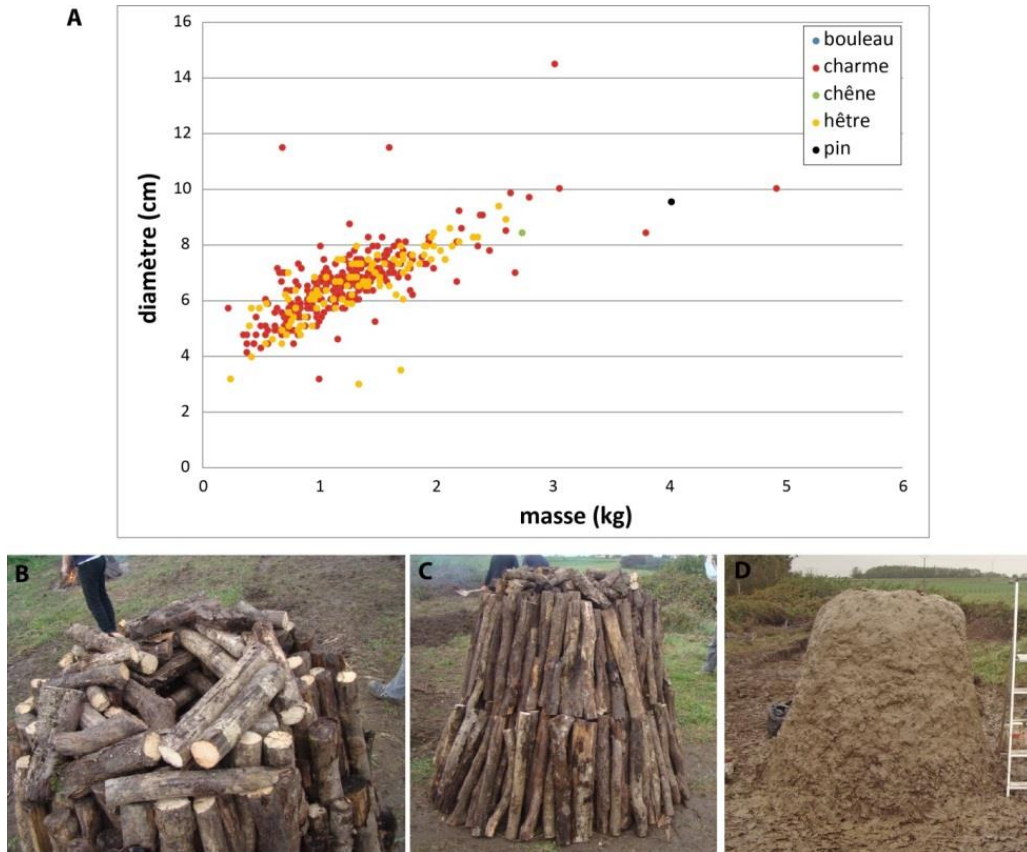


Figure 2.8 : La charbonnière expérimentale. A : Caractérisation des charbonnettes utilisées. B : Mise en évidence de la cheminée de la meule une fois montée. C : La meule avant d’être recouverte de feuilles et de terre. D : La meule une fois recouverte de feuilles et de terre.

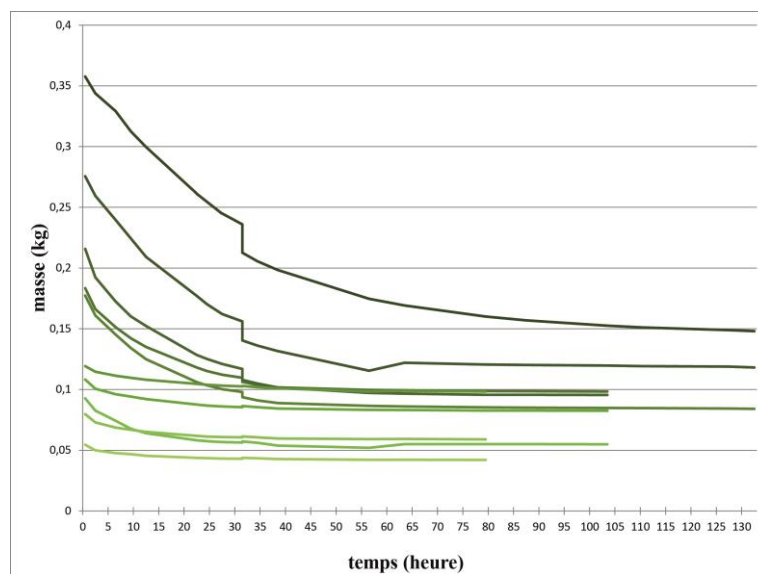


Figure 2.9 : Masses des 10 incuits mesurées au cours du séchage à l’étuve.

3.2.2.1.2 Résultats

La carbonisation de la meule expérimentale a permis d'obtenir 243 kg de charbons «humides» et plus de 35 kg d'incuits «humides». Après séchage des 10 incuits et des 9 charbons pris pour référence, le taux de masse sèche moyen des charbons est estimé à un peu moins de 50±7%, et celui des incuits et du bois a été estimé à près de 60±16% (**table 2.6**). Le total de charbons « secs » obtenus lors de la carbonisation est donc de 118.3 kg, et le total de bois « sec » utilisé dans la meule est de 315.9 kg.

Le rendement de la charbonnière expérimentale est calculé à partir de bois « frais » et de l'obtention de charbons « secs » puisqu'habituellement la carbonisation d'une charbonnière se termine sans avoir à éteindre les charbons de bois à l'eau. **Ce rendement est donc de 22.4% massique, ce qui correspond à 67 kg de charbon « sec » par stère de bois « frais », soit 89 kg de charbon par mètre³ de bois consommé.**

Table 2.6 : Estimation des pourcentages de masse sèche des incuits et des charbons de la charbonnière expérimentale, à partir des masses « humide » et masse « sèche » des incuits et charbons pris pour référence.

	masses (g)		% masse sèche	% masse sèche moyen	écart-type
	"humide"	"sèche"			
incuit 1	183,4	98,3	53,6	59,9	16,1
incuit 2	54,6	42,1	77,1		
incuit 3	215,8	95,5	44,3		
incuit 4	177,4	84,1	47,4		
incuit 5	357,6	148,1	41,4		
incuit 6	92,7	54,9	59,2		
incuit 7	79,7	59	74,0		
incuit 8	119,2	98,3	82,5		
incuit 9	275,6	118,1	42,9		
incuit 10	108,2	82,5	76,2		
charbon 1	210,7	102,9	48,8	49,6	7,2
charbon 2	629,6	378,3	60,1		
charbon 3	790,4	446,6	56,5		
charbon 4	532,7	233,4	43,8		
charbon 5	592,5	268,1	45,2		
charbon 6	441,6	201,8	45,7		
charbon 7	517,9	303,2	58,5		
charbon 8	475,4	231,7	48,7		
charbon 9	562,3	220,7	39,2		

3.2.2.1.3 Comparaison avec les rendements calculés dans d'autres régions

La **table 2.7** résume l'ensemble des données utilisées en comparaison dans le travail présent.

Le rendement calculé de notre charbonnière expérimentale permet de vérifier le rendement estimé de deux témoignages franc-comtois, et ainsi assurer la certitude de la donnée utilisée pour la suite de nos calculs. L'une de ces deux sources a été rédigée par le maître de forge des

forges d'Audincourt (Franche-Comté) du début du 20^{ème} siècle, qui a décrit précisément les quantités de charbons en m³ de bois obtenus par carbonisation, de différents bois de feuillus âgés de 25 ans ([Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1900](#)). Le rendement des charbonnières utilisées pour ces forges semble être de 18-20% massique avec un maximum de 25%, ce qui représente 38-40% volumique avec un maximum de 45%. Cette estimation correspond avec les 40% volumique fourni par un second témoignage écrit par un charbonnier de la région ([Bouchey, 1969](#)).

Le rendement des charbonnières franc-comtoises calculé dans ce travail de thèse et certifié par les deux témoignages cités ci-dessus est également en adéquation avec celui calculé pour des charbonnières belges et celui pour d'autres charbonnières françaises. Le rendement de charbonnières belges est de 60-80 kg de charbon obtenus par stère de bois, soit 80-106.7 kg de charbon par m³ de bois consommé ([Hardy and Dufey, 2012b](#)). Celui calculé pour le charbonnage meusien (France) est de l'ordre de 18% massique ([Arnould, 1978](#); [Cotheret, 1846](#); [Larzillière, 1887](#)), et celui en Languedoc (France) est de 15 à 18% ([Battesti, 1992](#)).

Dans le cadre de sa thèse [Paradis-Grenouillet \(2012\)](#) a réalisé un travail conséquent de synthèse des rendements de charbonnières françaises issus de sources ethnographiques et expérimentales ([Belhoste, 1990](#); [Charnoz, 2003](#); [Dornic and Grégoire, 1984](#); [Duhamel du Monceau, 1774](#); [Larcher, 1986](#); [Magne, 2004](#); [Paradis-Grenouillet et al., 2009](#); [Paradis-Grenouillet and Rouaud, 2009](#); [Peyronnet, 1958](#); [Schenkel et al., 1997](#); [Schlosser, 2004](#); [Texier-Olivier, 1808](#); [Y. Lamy, 1987](#)). Le rendement moyen qu'elle a calculé est de 59.5 à 80.6 kg de charbon par m³ de bois consommé.

Au regard de l'ensemble de ces données littéraires, expérimentales et de synthèse, il semblerait que la pratique de charbonnage propre à chaque région n'influence pas ou du moins, très peu le rendement de la charbonnière. D'ailleurs, [Schenkel et al. \(1997\)](#) ont défini un unique rendement massique mondial, partant du principe que quel que soit le savoir-faire appliqué pour l'édification d'une meule traditionnelle, le rendement reste le même. Il serait de 20 à 25%.

Le cas particulier des charbonnières de Rennes mentionné par [Duval \(1959\)](#) dans [Houzard \(1980\)](#) présente un rendement de 146.6 kg de charbon par m³ de bois consommé, bien loin au-dessus de toutes estimations réalisées en France ou en Belgique.

Pour la suite de ce travail de thèse, nous avons retenu l'estimation du rendement de la charbonnière expérimentale franc-comtoise calculé dans le paragraphe précédent, partant du fait que cette estimation reste la plus proche de la valeur réelle dans cette région.

Table 2.7 : Rendements estimés dans différentes régions et utilisés comme comparaison avec le rendement calculé à partir de la charbonnière expérimentale du présent travail.

données	source	lieu de l'étude
% massique		
20-25	Schenkel, 1997	quelque soit le pays
15-18	Battesti, 1992	Languedoc (France)
18	Arnould, 1978	Meuse (France)
18	Larzillière, 1887	Meuse (France)
17,5-18	Cotheret, 1846	Meuse (France)
18-20 max 25	Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1900	Audincourt (Franche-Comté, France)
22	présente étude	Franche-Comté
% volumique		
38-40 max 45	Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1900	Audincourt (Franche-Comté, France)
40	Bouchey, 1969	Franche-Comté
kg charbon/stère bois		
60-80	Hardy et Dufey, 2012	Wallonie (Belgique)
67	présente étude	Franche-Comté
kg charbon/m3 bois		
80-106,7	Hardy et Dufey, 2012	Wallonie (Belgique)
146,6	Duval, 1959	Bretagne (France)
59,3-80,64	Rouaud, 2013	Lozère et Périgord Limousin (France)
59,5-80,6	Paradis-Grenouillet, 2012	Lozère et Périgord Limousin (France)
113,2	Duhamel du Monceau, 1774	
100-103	Texier-Olivier, 1808	Haute-Vienne (Limousin, France)
103-110	Peyronnet, 1958	Périgord (France)
40,4-110	Lamy, 1987	Périgord (France)
50-60	Magne, 2004	Périgord Limousin (France)
54,2	Dornic, 1984	Rennes, Bretagne (France)
50	Belhoste, 1990	Bretagne (France)
120	FAO, 1984	
83,3	Schlosser, 2004	Alsace (France)
50	Association les charbonniers de Quincy	Centre-Val de Loire (France)
53,4-71	Charnoz, 2003	Jura, Franche-Comté (France)
89	présente étude	Franche-Comté

3.2.2.2 Production des charbonnières franc-comtoise. Le cas de la forêt de Chailluz

Selon la région, la contenance d'une charbonnière est assez variée, sans doute en raison du savoir-faire du charbonnier caractérisant la tradition locale. **Marié de L'Isle (1835)** rapporte des valeurs comprises entre 28 et 50 stères de bois par meule. **Schenkel et al. (1997)** estiment une contenance moyenne mondiale de 10 stères de bois. **François (1843)**, ingénieur des mines dans les Pyrénées, décrit des meules de 10 à 20 stères en montagne et 20 à 40 stères en plaine. En Franche-Comté, l'agenda du forestier décrit des charbonnières de 30 à 60 stères de bois (**Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1900**). Dans ces conditions il est assez difficile d'estimer de manière raisonnable la contenance des charbonnières de la forêt de Chailluz. Or, **Rouaud (2013)** a pu mettre en évidence durant sa thèse un rapport entre le diamètre de la plateforme de charbonnage et la contenance de la charbonnière qui y est érigée. D'après ses estimations une plateforme de 10 mètres de diamètre peut accueillir une charbonnière composée de 20 tonnes de bois, soit près de 57 stères. Et d'après la prospection

LiDAR réalisée en forêt de Chailluz (Fruchart, 2014), l'identification visuelle sur le terrain, et l'analyse spatiale magnétique des plateformes CH29 et CH30 de cette forêt (Dupin et al., 2017), le diamètre moyen des plateformes de Chailluz est également de 10 mètres. L'estimation faite par Rouaud semble donc concorder avec celle décrite dans l'agenda du forestier, c'est pourquoi nous retiendrons l'estimation de **30 à 60 stères de bois par meule pour la forêt de Chailluz.**

Compte tenu de cette estimation et du rendement d'une charbonnière franc-comtoise calculé dans le paragraphe 3.2.2.1, **la production d'une charbonnière de la forêt de Chailluz est de 2012 à 4024 kg de charbon, soit 8.6 à 17.1 m³.**

3.2.2.2.1 Production des charbonnières et réutilisation des plateformes de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz

En soustrayant la consommation bisontine de charbonnettes issues de la forêt de Chailluz à la fin du XIX^{ème} siècle (paragraphe 3.1.2.1 : 2929 stères) à la production totale de l'assiette ordinaire (paragraphe 2.2.1 : 5651 stères), il reste **2722 stères de bois issus de l'assiette ordinaire à exploiter par an entre 1882 et 1885.** En admettant que cette quantité de bois restante soit utilisée pour le charbonnage, alors entre **45 et 90 charbonnières** auraient pu être conduites avec ce stock restant, représentant la quantité de **388,5 à 1553.9 m³ de charbon de bois.**

Par ailleurs, Catherine Fruchart (2014) a pu définir au regard de l'analyse LiDAR de la forêt de Chailluz une moyenne de 0.4 places à charbon/ha sur les parcelles régies en coupes annuelles. Ce qui représente donc un peu plus de 33 plateformes de charbonnage par assiette. Ainsi en admettant que les plateformes de charbonnage aient été utilisées avec le bois de l'assiette où chacune d'elles se situe, alors chacune a été **réutilisée entre une et deux fois par an, au moins entre les années 1881 et 1885.**

3.2.2.2.2 Production des charbonnières et réutilisation des plateformes du quart de réserve de la forêt de Chailluz

Catherine Fruchart (2014) a défini une moyenne d'une place à charbon/ha dans ce canton. Ce qui représente près de **415 places présentes dans le quart de réserve.** Pour faire fonctionner au moins une fois ces 415 places à charbon, il est nécessaire d'utiliser entre **12438 et 24876 stères de bois.** Ces places produiraient alors entre **3550 et 7100 m³ de charbon.** Ces plateformes auraient tout à fait pu fonctionner durant la première coupe extraordinaire. Quelques voies de faits attestant de l'irrespect de l'adjudicataire concernant la régie du quart de réserve permettent effectivement de démontrer la présence de l'activité charbonnière dans ce canton, au moment de cette coupe. Pour exemple, dans un mémoire du 20 mai 1739 sur les entreprises faites en forêt de Chailluz (figure 2.1), le Grand Maître de la Maitrise constata que d'importantes quantités de bois, de charbon et de chaux ont été vendues sans autorisation par l'adjudicataire à des acheteurs inconnus. Nos estimations faites des productions de bois et de charbon de bois du quart de réserve permettent même de démontrer qu'elles y auraient pu être utilisées intensivement :

Si les plateformes de charbonnage avaient toutes été utilisées durant la première coupe extraordinaire, alors elles auraient pu être **réutilisées entre 3 et 4 fois avec le bois produit durant cette coupe** (paragraphe 2.1.2 : 65849 stères de bois). Toutefois, cette coupe a été induite par le besoin de bois pour la construction des nouvelles casernes (paragraphe 2.1.1 : 13710 stères). Et bien que l'adjudicataire ne respecta pas le cahier des charges, n'oublions pas, qu'en mars 1741, une demande de saisie du bois avait été déposée pour fournir cette quantité de bois nécessaire (figure 2.1). Nous pouvons donc supposer que ce fut le cas,

puisque le canton a été remis en vente et une saisie des bois coupé a été demandée. Dans ce cas, la part restante pouvant être utilisée à d'autres fins que le bois de construction devait représenter 52139 stères. Ce qui aurait pu permettre à l'ensemble des plateformes présentes dans ce canton d'être **réutilisées entre 2 et 4 fois durant la première coupe extraordinaire**.

3.2.3 Consommation de bois des usines métallurgiques franc-comtoises

Des travaux ont été réalisés sur la consommation des usines métallurgiques dans deux régions proches de la Franche-Comté, dans la Meuse (Arnould, 1978; Cotheret, 1846; Larzillière, 1887) et en Wallonie en Belgique (Hardy and Dufey, 2012b). La **table 2.8** résume les résultats de ces travaux. De manière générale, la consommation annuelle de bois d'une usine tourne autour de **18000 stères** dans ces régions. De plus, quelques études ont démontré que les forges et fourneaux se fournissaient en charbon de bois dans des forêts éloignées jusqu'à 50 km du site (Bonhôte and Vernet, 1988; Claerr-Roussel, 2000). Alors, en ne retenant que les usines métallurgiques situées à moins de 50 km de la forêt de Chailluz (cercle rouge sur la **figure 2.7**), il est possible d'estimer la consommation de bois moyenne des usines susceptibles de se fournir en combustible dans cette forêt. D'après les données de Lassus (1968), cette consommation moyenne en 1784 est d'un peu plus de **7015 cordes de bois, soit 19235 stères**. Ce qui correspond avec la consommation en bois des usines de Wallonie et de la Meuse. De même, elle correspond avec la consommation en bois de la forge de Montagney, située à une trentaine de kilomètres à l'ouest de Besançon (Canard and Serneels, 2000).

Ainsi, le bois produit de l'assiette ordinaire de Chailluz à la fin du XVIII^{ème} siècle (paragraphe 2.2.1 : 5651 stères), **était loin d'être suffisant pour faire fonctionner ne serait-ce qu'une usine franc-comtoise moyenne**. D'après Lassus (1968), les plus petites usines métallurgiques de la région consommaient entre 1000 et 1500 cordes de bois par an, soit entre 2742 et 4113 stères. Même cette faible **consommation est trop élevée pour qu'une petite usine puisse fonctionner en s'alimentant en bois de l'assiette ordinaire de Chailluz**. Ces remarques tendent à démontrer que l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz était principalement destinée au bois de chauffage de Besançon, et non pas à l'industrie métallurgique. D'ailleurs, des poursuites ont été engagées contre des marchands de bois qui firent du charbon pour les forges avec du bois affecté au chauffage de la ville de 1768 à 1785 (AMB DD115). La présence de près de 33 places à charbon par assiette, est d'ailleurs révélatrice de ce manque de respect de la loi par l'activité charbonnière.

En revanche, le charbonnage du stock complet de bois du quart de réserve disponible après la première coupe extraordinaire, en soustrayant le bois dédié à la construction des nouvelles casernes (paragraphe 3.2.2 : 52139 stères), suffisait à alimenter plus de **deux usines moyennes franc-comtoises sur un an, ou 13 à 19 usines à plus petite consommation**, tels que la taillanderie ou le martinet répertoriés à la mouillère et à Tarragnoz en 1744 et 1788 par François Lassus (**figure 2.7**).

Table 2.8 : Consommation de bois et de charbon de bois par une usine métallurgique par an. En gras, les données brutes issues des différentes études.

cordes bois	stères bois	m ³ charbon	tonnes charbon	localité	source
7294	20000	5762-6808,5	1600	Wallonie	Hardy et Dufey, 2012
5470-6564	15000-18000	4281-5185,5	1006-1219	Naix (Meuse)	Arnould, 1978
8206	22500	7500	1762,5	Naix (Meuse)	Arnould, 1978 (calcul de Hardy et Dufey, 2012)
6302	17280	4932	1159	Meuse	Cotharet, 1846
3020,5	8282	2364	555,5	Meuse	Larzillière, 1887
1000-1500 minimum	2742-4113	782,5-1174	184-276	Franche-Comté	Lassus, 1968
25000 maximum	68550	19564	4598		
moyenne à 50 km de Besançon: 7015,6	19237	5490	1290		
7514-9967	20602-27330	5880-7800	1382-1833	Montagney (Franche-Comté)	Canard et Serneels, 2000

4. Conclusion

La recherche archivistique menée durant cette thèse a permis de quantifier la production de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz à la fin du XVIII^{ème} siècle, ainsi que du quart de réserve lors de la première coupe extraordinaire, grâce à la transcription des différents procès-verbaux relatifs à l'exploitation de la forêt. La **figure 2.10** résume les données acquises et les interprétations faites dans ce chapitre.

Les besoins en bois de chauffage des bisontins à la fin du XVIII^{ème} siècle, ont pu être quantifié grâce aux travaux de François Vion-Delphin et ceux de Séverine Dianin. En revanche, bien que le livre de compte de la vente de charbonnettes issues de la forêt de Chailluz ait été un élément clef pour caractériser le bois de chauffage issu de cette forêt, il reste inutilisable pour caractériser la fin du XVIII^{ème} siècle, puisqu'il a été rédigé près de 100 ans plus tard. Malgré ce bémol, l'étude archivistique a permis de démontrer que l'assiette ordinaire de Chailluz a été exploitée en grande partie pour le bois de chauffage de Besançon. Les épisodes de charbonnage dans ces parcelles ne semblent pas avoir été intenses compte tenu du nombre de plateformes identifiées. De plus, ils sembleraient relever de l'interdit. Nous pouvons également préciser qu'à la fin du XVIII^{ème} siècle, les forêts extérieures à Besançon apportaient une grande partie (30%) du bois de chauffage de la ville par flottage sur le Doubs.

La production du quart de réserve lors de la première coupe extraordinaire, datant du début du XVIII^{ème} siècle, a pu être quantifiée grâce à un ensemble d'archives détaillant la chronologie de cette coupe. A ce moment-là, presque 21% de cette production a été destinée à la construction de nouvelles casernes à Besançon. Le reste, s'il était utilisé uniquement par l'industrie métallurgique, aurait permis de faire fonctionner 2 usines comtoises de taille moyenne ou 13 à 19 petites usines pendant un an. La détection LiDAR menée sur cette forêt durant la thèse de Catherine Fruchart a aidé à déterminer le nombre de plateformes présentes dans le quart de réserve. Nous avons donc pu préciser que cette production de bois pour les usines métallurgiques aurait pu être charbonnée en utilisant 2 à 4 fois chacune des plateformes présentes dans le quart de réserve.

Finalement, dans le but de compléter les données quantitatives de l'exploitation de la forêt de Chailluz au cours du XVIII^{ème} siècle, il serait nécessaire de dépouiller les AMB

traitant de la seconde coupe extraordinaire du quart de réserve, datant du milieu du siècle. Pour compléter nos interprétations faites sur la première coupe extraordinaire, il faudrait également quantifier la production de bois issue de cette coupe, à destination d'autres lieux de consommation que la métallurgie ou le chantier des casernes. D'autre part, il serait judicieux de se plonger dans l'analyse des archives abordant l'exploitation des autres forêts bisontines, ainsi que celle de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz au cours du XVIII^{ème} siècle. Ceci dans le but de préciser de manière quantitative les différentes productions des forêts affectées au bois de chauffage de la ville. Pour cette étude, il faudrait alors se plonger dans la lecture des ADD et non plus seulement des AMB. En effet, l'ADD B 17124 est un registre sur les forêts affectées au chauffage de Besançon, mentionnant semblerait-il les 5 forêts bisontines. Le double constat évoquant l'affectation de ces forêts pour le chauffage de la cité en 1726 et la diminution de moitié du bois de Bregille entre 1738 et 1768-73, semblent effectivement aller dans ce sens.

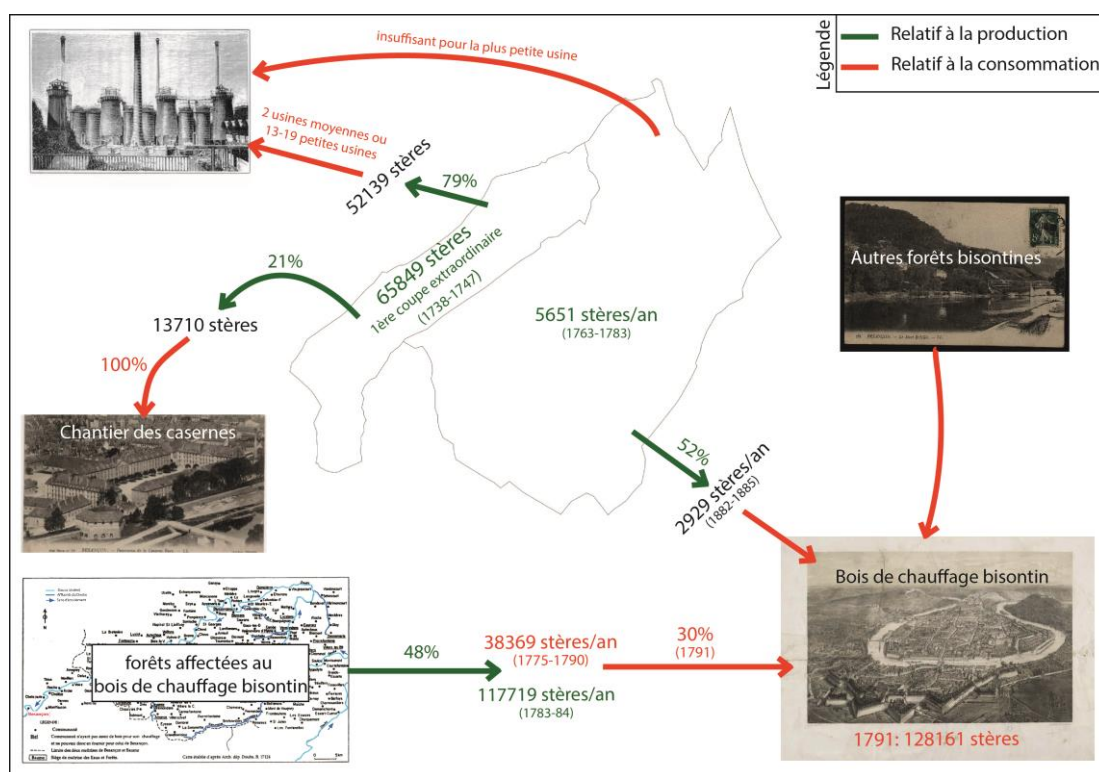


Figure 2.10 : Représentation schématique des productions et des consommations de bois sur le territoire bisontin au XVIII^{ème} siècle, calculées à partir des AMB (crédit photo : carte postale du mont de Bregille : AMB CP-B-P16-0194 et carte de Besançon : AMB non côté)

Sources et bibliographie

- Actu Environnement, 2012. Dictionnaire Environnement [WWW Document]. URL https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition.php4 (accessed 4.3.17).
- Andrieux, J.-Y., Arnoux, M., Belhoste, J.-F., 1988. Forges et forêts : histoire industrielle de la France.
- Arnould, E., 1978. Métallurgie au bois et utilisation de la forêt. *Revue forestière Française* 6, 459–477. doi:10.4267/2042/21254
- Battesti, V., 1992. Une charbonnière expérimentale. université Montpellier II, Montpellier.
- Bechmann, R., 1984. Des arbres et des hommes : la forêt au Moyen âge.
- Belhoste, J., 1990. Une sylviculture pour les forges, XVIIe-XIXe siècles, in: *Forges et Forêts : Recherches Sur La Consommation Proto-Industrielle de Bois*. éd. de l'école des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, pp. 219–261.
- Bonhôte, J., Vernet, J.-L., 1988. La mémoire des charbonnières. Essai de reconstitution des milieux forestiers dans une vallée marquée par la métallurgie (Aston, Haute-Ariège). *Revue forestière française* 40, 197–212.
- Bouchev, E., 1969. le charbonnier dans les bois. Folklore comtois, Besançon.
- Bourgin, H., Bourgin, G., 1920. L'industrie sidérurgique en France au début de la Révolution. Paris.
- Canard, C., Serneels, V., 2000. Quelques chiffres concernant le haut fourneau de Montagney en 1833, in: *Miaria Helvetica. La Forge de Montagney - Franche-Comté*. Bulletin de la Société Suisse d'Histoire des Mines, Basel, pp. 66–72.
- Charnoz, J.-C., 2003. Les forges de Baudin et le charbon de bois.
- Chomel, V., Ebersolt, J., 1951. Cinq siècles de circulation intérieure vue de Jougne (Un péage jurassien du XIII au XVIIIe siècle). A. Colin, Paris.
- Claerr-Roussel, C., 2000. Le procédé comtois d'affinage du fer: naissance et mise en place de nouvelles structures de travail au XVIIIe siècle, in: *Minaria Helvetica. La Forge de Montagney - Franche-Comté*. Bulletin de la Société Suisse d'Histoire des Mines, Basel, pp. 105–115.
- Cotheret, M., 1846. Documents statistiques sur l'emploi des bois dans la Meuse.
- Delsalle, P., 2004. Lexique pour l'étude de la Franche-Comté à l'époque des Habsbourg : 1493-1674. Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon.
- Dianin, S., 1995. Les forêts à Besançon au XVIIIème siècle (Master's thesis). Université de Franche-Comté.
- Dornic, F., Grégoire, P., 1984. Le fer contre la forêt. Ouest France université, Rennes.
- Duhamel de Monceau, H.L., 1774. Description des arts et métiers, faits ou approuvés par Messieurs de l'Académie royale des Sciences. Art du charbonnier, Desaint et. ed. Paris.
- Duhamel du Monceau, H.L., 1774. L'art du charbonnier, in: *Description Des Arts et Métiers*, Tome 2. Imprimerie de la Société typographique, Neuchâtel, pp. 645–707.
- Dumolard, P., 1973. Disparités spatiales de l'intensivité agricole en Italie. *Espace géographique* 2, 50–62. doi:10.3406/spgeo.1973.1374
- Dupin, A., Girardclos, O., Fruchart, C., Laplaige, C., Nuninger, L., Dufraisse, A., Gauthier, E., 2017. Anthracology of charcoal kilns in the forest of Chailluz (France) as a tool to understand Franche-Comte forestry from the mid-15th to the early 20th century AD. *Quaternary International* 458, 200–213. doi:10.1016/j.quaint.2017.03.008
- Duval, M., 1959. Forêt et civilisation dans l'Ouest au XVIIIème siècle.
- FAO, 1984. Techniques simples de carbonisation. *Forêts* 41, 1–152.
- Fiétier, R., Brelot, C.-I., 1977. Histoire de la Franche-Comté. Privat.
- Forlin, P., Laurent, H., 2014. Exploiting local resources in a new economic frame : Iron ores

- and bloomeries in Franche-Comté (F) during the Early Middle Ages, in: Silvertant, J. (Ed.), *Research and Preservation of Ancient Mining Areas, 9th International Symposium on Archaeological Mining History (Trento)*. Yearbook of the Institute Europa Subterranea, Trento/Valkenburg de Geul, pp. 196–217.
doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- François, J., 1843. *Recherches sur le gisement et le traitement direct des minerais de fer dans ...* - Jules François - Google Livres. Stanford university library, Paris.
- Fruchart, C., 2014. *Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours*. (PhD thesis). Université de Franche-Comté.
- Ghali, M., Daniel, K., Colson, F., Sorin, S., 2014. *L'agriculture écologiquement intensive. Une approche économique*. *Economie Rurale* 341, 83–99.
doi:10.4000/economierurale.4338
- Grangez, E., 1840. *Traite de la perception des droits de navigation et de peage sur les fleuves, rivières et canaux navigables ou flottables en trains, appartenant à l'Etat ou concédés*. Librairie scientifique-industrielle de L. Mathias, Paris.
- Hardy, B., Dufey, J., 2012a. *Estimation des besoins en charbon de bois et en superficie forestière pour la sidérurgie wallonne préindustrielle (1750-1830). Deuxième partie: les besoins en superficie forestière*. *Revue Forestière Française* 6.
- Hardy, B., Dufey, J., 2012b. *Estimation des besoins en charbon de bois et en superficie forestière pour la sidérurgie wallonne préindustrielle (1750-1830). Première partie: Les besoins en charbon de bois. Révolution forestière française* 4.
- Houzard, G., 1980. *Les grosses forges ont-elles mangé la forêt ?* *Annales de Normandie* 30, 245–269. doi:10.3406/annor.1980.6346
- Jacob, J.-P., Mangin, M., 1990. *De la mine à la forge en Franche-Comté: des origines au XIXe siècle*. Les Belles. ed. *Annales littéraires de l'Université de Besançon*, Besançon.
- Larcher, G., 1986. *Les charbonniers à Paimpont. Contribution à l'histoire d'une commune*, Le Chatenay Hors série.
- Larzillière, F., 1887. *Les forêts de la Meuse et leurs produits*.
- Lassus, F., 1968. *Les établissements métallurgiques en Franche-Comté aux XVIIe et XIXe siècles* (PhD thesis). université de Franche-Comté.
- Leroy, M., Mangin, M., Laurent, H., Boukezzoula, M., Raïssouni, B., 2000. *La sidérurgie dans l'est de la Gaule. L'organisation spatiale de la production de l'Âge du Fer au haut Moyen Age*. *Gallia* 57, 11–21. doi:10.3406/galia.2000.3206
- Magne, C., 2004. *Au temps où le Périgord-Limousin-Angoumois canonait en Atlantique : du fer et des canons pour sa Majesté*. Varaignes.
- Malepeyre, A.F., 1836. *Maison rustique du XIXe siècle: encyclopédie d'agriculture pratique*. Tome quatrième. *Agriculture forestière, législation et administration rurale*. Au Bureau. ed. Paris.
- Marié de L'Isle, E.-B., 1835. *Manuel complet des marchands de bois et de charbons, ou Traité de ce commerce en général*. La librairie encyclopédique de Roret, Paris.
- Ministère des travaux publics, 1840. *Documents relatifs aux canaux*. Imprimerie royale, Paris.
- Noirot, 1843. *De l'influence de l'entrée des fers étrangers sur les produits des forêts*.
- Paradis-Grenouillet, S., 2012. *Etudier les forêts métallurgiques: analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. L'exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin* (PhD thesis). Université de Limoges.
- Paradis-Grenouillet, S., Rouaud, R., 2009. *De la charbonnière à la forêt combustible: apport de l'expérimentation*.
- Paradis-Grenouillet, S., Rouaud, R., Allée, P., Euba-Rementería, I., 2009. *De la charbonnière à la forêt combustible: l'apport de l'expérimentation*. in: *SRA Limousins* (Ed.), PCR :

- Géoarchéologie et Géohistoire Des Territoires Forestiers Limousins. Limoges, pp. 143–150.
- Peyronnet, E., 1958. Les anciennes forges de la région du Périgord, Delmas. ed. Bordeaux.
- Plaisance, G., 1963. Tensions, oppositions, hésitations et contradictions dans les forêts feuillues comtoises au XVIIIe siècle. revue forestière française 6.
- Rouaud, R., 2013. Les forêts de pente de la haute vallée de la Dordogne : enjeux écologiques et énergétiques (PhD thesis). Université de Limoges.
- Schenkel, Y., Bertaux, P., Vanwijnsberghe, S., 1997. Une évaluation de la technique de la carbonisation en meule. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement 1, 113–124.
- Schlosser, C., 2004. Les charbonniers. Lembach.
- Sergent, E., 1874. Traite Pratique et Complet de Tous les Mesurages, Metrages, Jaugeages de tous les corps. A. Morel et Cie, libraires-Editeurs, Paris.
- Société forestière de Franche-Comté et Belfort, 1900. Agenda du forestier pour 1900. Paul Jacquin, Besançon.
- Texier-Olivier, 1808. La statistique générale de la Haute Vienne en 1808.
- Vion-Delphin, F., 1991. l’approvisionnement en bois de chauffage d’une capitale provinciale au XVIIIe siècle: le cas de Besançon, in: Le Bois et La Ville Du Moyen-Âge Au XXe Siècle. Colloque de Saint-Cloud 18-19 Novembre 1988. pp. 51–74.
- Vion-Delphin, F., Lassus, F., 1989. Le bailliage de Quingey en 1789: les cahiers de doléances. Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon.
- Woronoff, D., 1990. Forges et forêts: recherches sur la consommation proto-industrielle de bois. Edition de l’école des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- Woronoff, D., 1984. L’industrie sidérurgique en France pendant la Révolution et l’Empire. Ecole des hautes études en sciences sociales.
- Y. Lamy, 1987. Hommes de fer en Périgord au XIXe siècle. La Manufacture, Lyon.

Chapitre 3

De l'étude anthracologique des plateformes de charbonnage en forêt de Chailluz, à la compréhension de la pratique

Ce chapitre a fait l'objet d'un article publié dans Quaternary International en avril 2017.

ARTICLE IN PRESS

Quaternary International xxx (2017) 1–14


ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Quaternary International

journal homepage: www.elsevier.com/locate/quaint



Anthracology of charcoal kilns in the forest of Chailluz (France) as a tool to understand Franche-Comte forestry from the mid-15th to the early 20th century AD

Aurore Dupin ^{a, b, *}, Olivier Girardclos ^b, Catherine Fruchart ^a, Clément Laplaige ^{a, b, c},
Laure Nuninger ^{a, b}, Alexa Dufraisse ^d, Emilie Gauthier ^b

^a USR 3124, MSHE C.N. Ledoux, 1 rue Charles Nodier, 25030 Besançon cedex, France
^b UMR 6249, Laboratoire Chrono-environnement, 16 route de Gray, 25030 Besançon cedex, France
^c UMR 7324, CITERES-LAT, 33 allée Ferdinand de Lesseps, 37204 Tours cedex 3, France
^d Sorbonne Universités, CNRS, Muséum national d'Histoire naturelle, UMR 7209, Archéozoologie, Archéobotanique: sociétés, pratiques et environnements, CP56, 55 rue Buffon, 75005 Paris, France

Abstract/ Résumé

The Franche-Comte region played an important role in the iron industry since at least the Hallstatt Period, but particularly since the industrial revolution (from the end of the 18th century). The presence of thousands of charcoal kilns in the main forest of Besançon (regional capital) is the subject of this study. The aim was to further our understanding of these archaeological objects, and to characterize the impact of charcoal production on the past vegetation. A geophysical survey (magnetic susceptibility) was conducted on two platforms. Charcoal analyses of 11 charcoal kilns and a regressive approach on the current vegetation were undertaken for comparative purposes. The platforms are modern and seem to have been used several times during a short 250-year period. Based on historical sources and compared with forests used for the iron industry, the vegetation of the forest of Chailluz appears to have been harvested for a variety of purposes, notably the iron industry and domestic use. Tree species used to produce charcoal were correlated with the environmental offering and site conditions but charcoal production seemed to open the forest structure. More light demanding taxa and fewer shade-tolerant species than nowadays have been observed.

La Franche-Comté joua un rôle important dans l'industrie métallurgique, au moins depuis le premier âge du fer, et particulièrement depuis la Révolution industrielle (depuis la fin du 18^{ème} siècle). La présence d'un millier de plateformes de charbonnage dans la forêt principale de Besançon (capitale régionale) est le sujet de cette étude. Le but de ce travail était d'améliorer notre compréhension de ces objets archéologiques, et de caractériser l'impact de la production de charbon sur la végétation de l'époque. Une étude géophysique (susceptibilité magnétique) a été conduite sur deux de ces plateformes. Une étude anthracologique a été menée sur 11 places à charbon et une approche régressive de la végétation actuelle a été entreprise dans un but comparatif. Les places à charbon analysées sont modernes et semblent avoir été utilisées plusieurs fois en 250 ans. En se basant sur les sources historiques et en comparant avec des forêts métallurgiques, la forêt de Chailluz semble avoir été utilisée pour de nombreux usages, notamment pour l'industrie métallurgique et pour le bois domestique. Les espèces d'arbres utilisées pour le charbonnage étaient corrélée avec la ressource environnementale et les conditions de site, mais la production de charbon semble avoir ouvert la structure forestière. En effet, plus de taxons héliophiles et moins de taxons schiaphiles ont pu être observés par rapport à aujourd'hui.

1. Introduction

Since the end of the Roman period, iron production and iron working were a key industry in Franche-Comte, a region in north-eastern France, where subsoil locally contains significant amounts of iron ore, and which is located on trade and transportation routes (Fiétier and Brelot, 1977; Jacob and Mangin, 1990; Leroy et al., 2000). For instance, north-western Franche-Comte was an important place of iron production during the Early Middle Ages (400-650 AD), with iron working sites containing large amounts of smelting waste and slag (Berthelange area: Forlin and Laurent, 2014). In southern Franche-Comte, archaeological surveys also attest to tenuous traces of a so called “monastic metallurgy” since the 5th century (Benoit and Cailleaux, 1991; Bully et al., 2015). This latter production was probably for local trade rather than for large-scale trade. During the industrial revolution in the 18th and 19th centuries, steelmaking activities increased significantly, and on the eve of the French Revolution in 1789 Franche-Comte ranked among the leading French regions for the production of iron and cast-iron (Lassus, 1968; Morin, 1993).

On a local scale, thousands of charcoal kilns have been discovered in the forest of Besançon, the capital of Franche-Comte. Most of these are in the forest of Chailluz, a woodland on the fringes of the city (Fruchart, 2014). They were detected using LiDAR data (high resolution altimetric data obtained by aerial laser sensor : Baltsavias, 1999; Wehr and Lohr, 1998) and have been studied archaeologically and environmentally investigated (Fruchart, 2014; Fruchart et al., 2014; Laplaige, 2012; Nuninger et al., 2015, 2010; Opitz et al., 2015) (Figure 3.1). Do these numerous small circular platforms attest to massive charcoal production for the past iron industry, or do they testify of other uses?

Over the past years, several archaeological papers focused on these features in different places in Europe, studying platforms with diverse approaches using LiDAR data and fieldwork (Deforce et al., 2013; Ludemann, 2012; Raab et al., 2015; Rassat et al., 2015, 2013; Trier et al., 2016).

Our study aims to probe the archaeological content of the kilns and to better understand their use over time. We also aim to improve our understanding of charcoal production in Besançon, to assess the local impact of this production on forest vegetation and to understand when and how charcoal was produced. To achieve these objectives, we characterized a series of platforms using radiocarbon dating and magnetic susceptibility (MS), in order to assess the intensity of charcoal production and to define whether platforms were reused over time. Furthermore, we applied a regressive approach to the present-day vegetation, in order to characterize past vegetation, to better understand past forest management and to better evaluate environmental diversity and structure of the forest of Chailluz. The anthracological spectra of the platforms were compared and contrasted with current vegetation, as attested by maps and catalogues of forest stands, and by botanical surveys performed around the kilns.

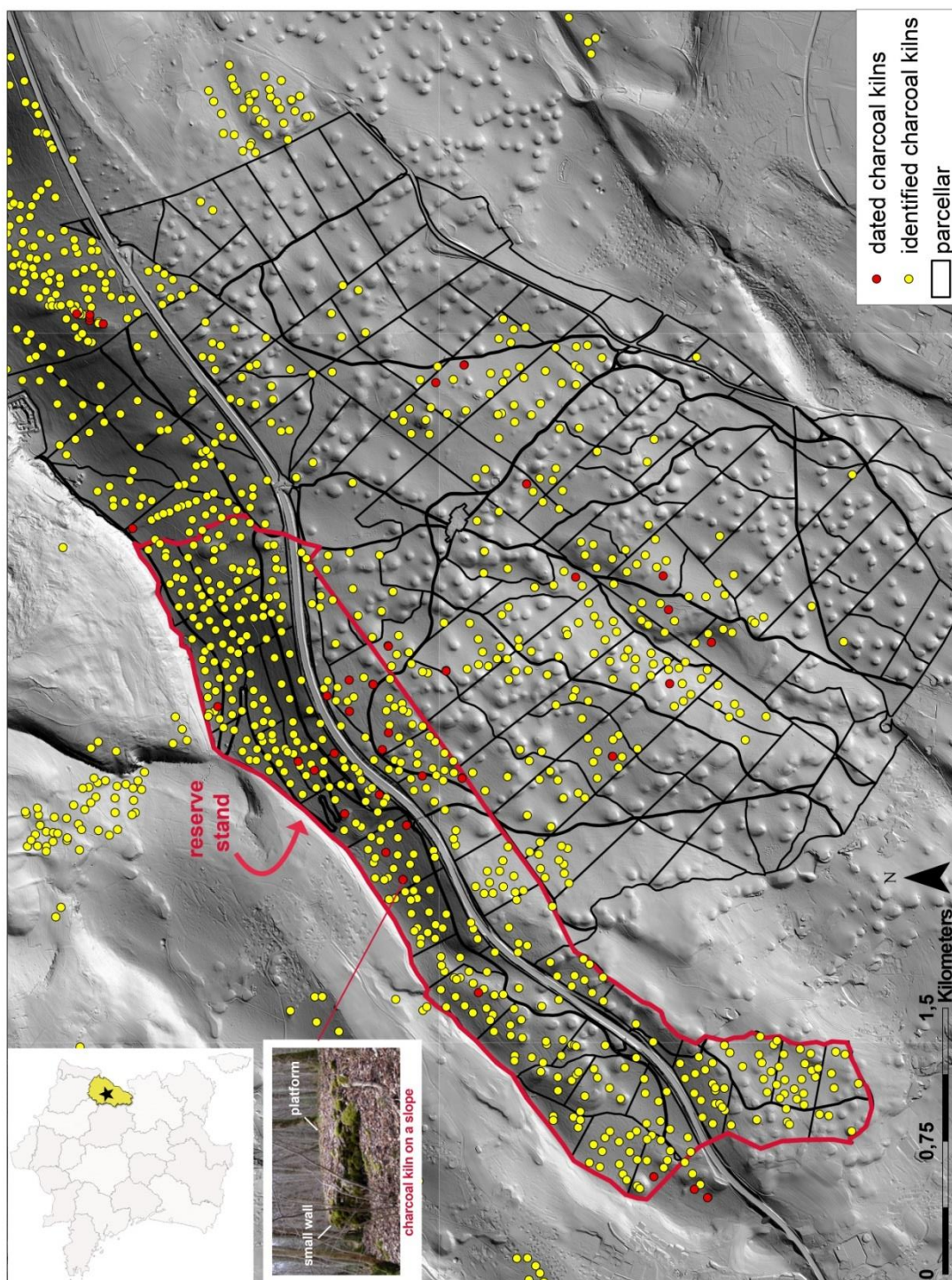


Figure 3.1 : The forest of Chailluz on a LiDAR projection (data : Fruchart, 2014). Charcoal platforms are represented in red and yellow dots.

2. Study area

2.1 Historical background

Besançon's charcoal production has been linked *a priori* to the iron industry, although much of this work has focused on places where the industry was well-developed (Bouchey, 1969; Claerr-Roussel, 2000; Crew and Mighall, 2013; Wheeler, 2011). Historical studies show that the iron industry was kept away from Besançon between the 17th and 19th centuries, mainly for economic reasons, to avoid a significant increase in wood prices (Vion-Delphin, 1991). Consequently, charcoal may have been produced in Besançon during other periods and for other purposes, possibly local craft or domestic use. For instance, it is known that charcoal was also used for cooking or heating (e.g. Deforce and Haneca, 2015; Namaalwa et al., 2009; Syred et al., 2006). Besançon's platforms could be the remains of a long-lasting production, designed for local needs over many centuries because the forest of Chailluz already existed in the Middle Ages.

At a regional scale, the iron industry is, historically, considered to be one of the main causes for wood shortages in Franche-Comte during the 18th and 19th centuries (Arnould, 1978). Forests also supplied wood and by-products for many other activities (Demard, 1980). Historical studies reveal that the iron industry (the "Forges Comtoises" company) accounted for 40 % of wood consumption in Franche-Comte in 1784, against 6 % for other industries, including salt production (the "Salines" of Salins-les-Bains), a large fuel-wood consumer (Jacob and Mangin, 1990; Lassus, 1968). A special technique was even designed, named the "Comtois process", to offset wood shortages in Franche-Comte during this period. It was a development of the Walloon method used since the 16th century (Lassus, 1968): charcoal was burnt in blast and smelting furnaces, and stumps and wood shavings were used to heat the officers' quarters (Faiseau-Lavanne, 1829). The "Comtois process" was preferred because it had a better yield with a lower wood consumption than the Walloon process (Claerr-Roussel, 2000).

From a demographic perspective, Besançon has continuously been an urban center since the Roman Period, and the main regional town. Therefore, archaeologists and historians assume it was always significantly populated. Franche-Comte's population dramatically decreased during the first half of the 17th century because of wars. It quickly rose again in Besançon after a few decades, thanks to significant migration from surrounding regions and to the permanent stay of military troops (Lassus, 1968). Consequently, the population of Franche-Comte's capital increased by 150 % in 70 years during the 18th century (Fohlen, 1982). During this period, historical studies suggest a serious wood shortage, specifically in Besançon (e.g. Vion-Delphin, 1991). To fulfill demands for wood, timber was harvested in the forests of 244 towns around the regional capital, as far as several dozen kilometers, and was floated to Besançon's harbor on the Doubs River.

2.2 Current vegetation

Historically, the forest of Chailluz is attested since the end of the 13th century (Bépoix, 2010; Fiétier, 1973). It is located north of Besançon and currently covers an area of around 1700 hectares, and constitutes the western part of an extended woodland (80 km²) in the forelands of the Jura Mountains.

The substrate is a limestone bedrock (mean altitude between 300 and 350 m a.s.l.) forming a plateau with a series of low relief folds, and one pronounced mountainous fold rising between 450 and 600 m a.s.l., in the northern part of the plateau. This latter fold coincides with the boundary of Besançon's territory since the 14th century (Fruchart, 2014). The terrain is a karst dotted with more than 500 *dolines* (sinkholes) and has polygenic soils, mostly mesotrophic. Some areas contain specific local conditions with chert and clay with oligotrophic soils or leached soil. The soils are mostly brunisols (Gaiffe and Bruckert, 1985). In Western Europe, three deciduous species dominate lowland temperate forests: oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) and beech (*Fagus sylvatica*). And, in our specific case and when site conditions are beneficial to oak and beech, hornbeam (*Carpinus betulus*) is typically an understory species but can play an important role under more severe conditions (Rameau et al., 2008, 1980).

The interpretation of the current vegetation of the forest of Chailluz includes data from forestry catalogues. A forest site is a surface where ecological factors are similar and homogeneous (Delpech et al., 1985). There are currently 15 sets of forest sites in the forest of Chailluz (Paget and A. Schmitt, 1992; Zipper and Le Jean, 1995). For this study, these 15 sets were grouped into three main forest types, each containing forest sites with strong analogies, based on soil characteristics, exposure and current vegetation (Figure 3.2). The first forest type is composed of deep soils, with cherts and clays. It is a suitable place for oak and beech. Vegetation surveys show that it is difficult for hornbeam to develop within these forest stands, and pedological diagnostics show that soils are acid. The second forest type is composed of a plateau soil with only lime-based materials, thicker than in the previous type. These areas are much more neutrophilous and hornbeam is more prevalent. The last forest type is found on slopes oriented south/south-east. Soils are shallow and support more light demanding taxa (i.e. *Maloideae* or *Ligustrum vulgare*) in addition to hornbeam and beech. This grouping includes, in the second forest type, the resinous plantation of almost 300 ha introduced into the Eastern part of the forest (Praicheux, 1972).

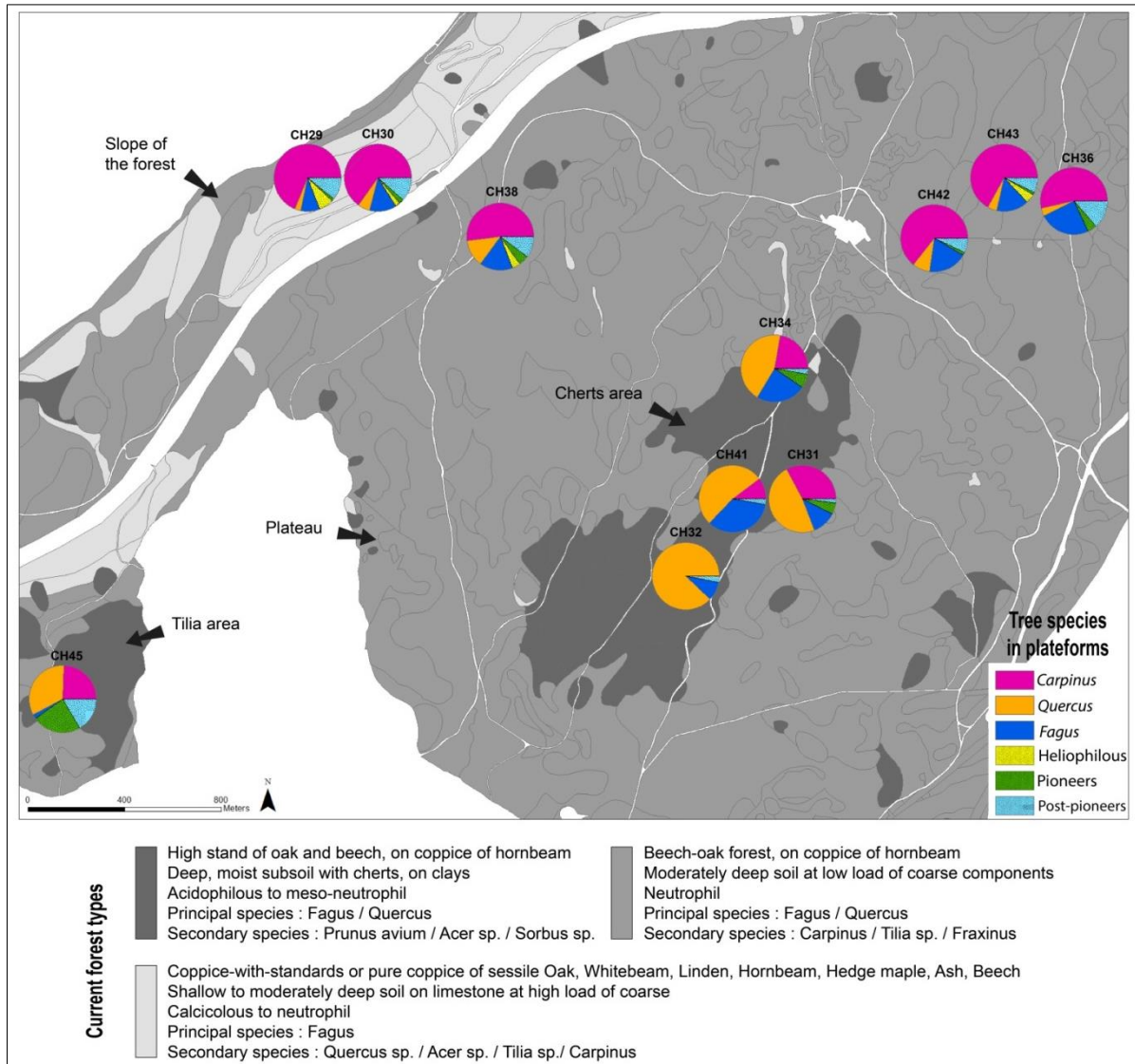


Figure 3.2 : The forest of Chailluz represented with current forest types (data: Office National des Forêts) and results of charcoal analysis on charcoal kilns.

3. Material and methods

3.1 Material: Charcoal kilns

Charcoal platforms were identified and mapped using LiDAR data (Fruchart, 2014; Nuninger et al., 2015), and corroborated by fieldwork. Chailluz' platforms have two morphologies, depending whether they are situated on slopes or on a flat terrain. All have a horizontal combustion area, a circle around 8 m diameter. Sometimes they are slightly oval due to erosion (especially on slopes). Charcoal kilns located on slopes are partly built structures, with their horizontal combustion areas installed on terraced ground and bordered by small stone walls forming half of the platforms' perimeters (photograph on **figure 3.1**). All the surveyed platforms possessed a relatively homogeneous char horizon with a depth of between 20 and 30 cm.

3.2 Charcoal kilns: sampling

Given the great number of platforms in Chailluz and the means of our research, it was impossible to work on a statistically representative number of individuals. However, we studied a group of kilns chosen as close as we could to being a representative sample. The platforms were selected on criteria resulting from spatial analysis and taking into account topography. To gain significant insight into the past vegetation, platforms were sampled by selecting at least two individuals from each of the 3 forest types (*cf.* 2.). The deeper soil type (dark grey) includes a "tilia area" and a chert area. The shallower soil forest type (light grey) is located on the slopes. The third forest type roughly corresponds to the plateau (**Figure 3.2**). As suggested by Davasse (2000), platforms were sampled in the center of the half-platform, where the char horizon is best preserved and is the thickest. Samples were 30 cm by 30 cm squares and were collected by layers identified by color and/or texture changes in the soil (Davasse, 2000; Py and Ancel, 2006). Charcoal concentrations were calculated as the number of fragments per liter of sediment. Water sieving was carried out in the lab with a 5 mm mesh sieve (Badal-Garcia, 1987; Chabal, 1992).

3.3 Radiocarbon dating

Radiocarbon dating was performed on 39 platforms to determine their period of use (**figure 3.1**). We obtained a total of 46 dates (**Table 3.1**). 41 charcoal samples were taken from the bottom of the soil layers containing charcoal: 37 samples were taken once per platform, and samples were taken twice per platform at two levels (CH17 and CH32). Moreover, for five platforms, a sample was taken at the top of the soil layer containing charcoal (CH17, CH32, CH41, CH42 and CH44). Collecting samples both from the top and from the bottom of soil layers containing charcoal intended to highlight possible reuse of the platforms over time. This was not necessarily discernable to the naked eye based on the stratigraphy alone. All the necessary precautions were taken to select only the last tree rings of branches or twigs, in order to avoid the "old wood" effect (Waterbolk, 1971).

Radiocarbon AMS measurements were provided by the Poznan radiocarbon laboratory in Poland and by the Beta Analytic, radiocarbon laboratory in Miami, Florida (Yates et al., 2015). Radiocarbon ages were calibrated using OxCal v.4.2.4 (Ramsey, 2013), on IntCal13 atmospheric curve (Reimer et al., 2013).

Table 3.1 : Radiocarbon dates (BP) of platforms of Chailluz.

platform	radiocarbon date (BP)	Insecurity	platform	radiocarbon date (BP)	Insecurity
CH1	100	25	CH25	150	30
CH2	130	30	CH26	120	25
CH3	123	30	CH27	115	30
CH4	200	25	CH28	70	25
CH5	230	30	CH29	160	30
CH8	100	25	CH31	100	30
CH9	115	35	CH32	100	30
CH10	100	30	CH32 bis	115	30
CH11	110	30	CH32 sup	50	30
CH12	155	25	CH33	110	30
CH13	210	30	CH34	85	30
CH14	175	30	CH35	85	30
CH15	110	30	CH36	125	30
CH16	105	30	CH37	65	30
CH17	340	30	CH38	115	30
CH17 bis	100	30	CH39	100	30
CH17 sup	85	30	CH40	85	30
CH18	130	25	CH41	55	30
CH19	165	30	CH41 sup	65	30
CH20	110	30	CH42	100	30
CH21	130	30	CH42 sup	95	30
CH23	165	25	CH44	85	30
CH24	225	25	CH44 sup	65	30

3.4 Magnetic susceptibility (MS) on two platforms

Magnetic susceptibility is the expression of the magnetization carried over from the substrate, which is influenced by the magnetic field (Hulin et al., 2012; Laplaige, 2008; Petronille, 2009). The MS is sensitive to, *inter alia*, the temperature (Marmet and Bina, 1999). Consequently, MS measurements on a soil which has suffered from fire give a higher signal at the surface of the profile than at depth (Le Borgne, 1955). An experiment on three charcoal kilns (Paradis-Grenouillet, 2012) revealed temperatures close to 800°C of underlying soil near the chimney during the first five hours for one of the kilns, and between 400°C and 600°C for all three kilns on at least half of the surface of the underlying soil, indicating that soil suffered from fire and could be detected by MS measurements. Another study on an experimental charcoal kiln demonstrated that the temperature in the underlying soil was relatively low, with maximum temperatures measured on the platforms inferior to 200°C. However, the temperatures measured in the kiln were between 400°C and 900°C, and yielded similar results to the Paradis-Grenouillet experiment. These data suggest that the MS signal could be due to contamination from the wood stack (Powell et al., 2012).

Considering these experimental results and the properties of the MS method, two platforms (CH29 and CH30) were analyzed to identify the impact of carbonization on soil, and to reveal possible successions of charcoal production. The ultimate objective was to assess the intensity of charcoal production in the forest of Chailluz and to determine whether the platforms were used only once or repeatedly over time.

CH29 and CH30 are both located on slopes. To identify the area used on the platform and the places where temperature was the highest during carbonization, we measured the MS signal to the surface of the platform using a grid with a 1m×1m mesh. Measurements were made with a Bartington MS2D sensor, with seven measurements per point and the surrounding 30 cm to avoid local anomalies due to metal objects, for example. To exclude the influence of weather (moisture, temperature and atmospheric pressure) on the results, measurements were made during the same day on both platforms.

To identify different possible uses, which are difficult to discern using the naked eye, MS signal measurements were made along the soil profile of platforms, where the soil was the thickest, namely at the periphery of the platform. To avoid the effect of weather and wind change, measurements were made during the same day and in a 30 cm × 30 cm pit dug *in situ* on the platform, and in the laboratory on a soil column sampled from the pit. Measurements were made with a Bartington MS2B sensor, with three measurements at regular 0.5-centimeter intervals and on a transversal transect to avoid local perturbation. A mean curve was calculated with data from the pit and from the soil column.

3.5 Charcoal analysis

The charcoal identification was carried out on 11 charcoal kiln platforms (**Figure 3.2**). For all of them, no stratigraphy in the soil layer containing charcoal could be clearly established within the analyzed soil columns. Therefore, we did not analyze either the top and or bottom of the layers, as however recommended by Davasse (Davasse, 1989; Davasse and Galop, 1990). We can argue that the absence of an obvious stratigraphy in this soil layer containing charcoal is not very surprising, considering the repeated mixing and dislocation of the soil during the traditional charcoal making process. Two different radiocarbon ages from the bottom of the layer containing charcoal in CH17 (*cf.* 4.1) underscore this mixing of the soil. Moreover, a preliminary statistical test undertaken on CH29 and CH30 showed that the anthracological spectra of the top and of the bottom of the charcoal-rich layer were similar, with respect to their location in the same forest site (*cf.* 4.3). Consequently, the anthracological analysis was performed without regard for whether it was soil from the top or from the bottom of the layers.

Usually, the number of charcoal fragments to be analyzed is estimated as a function of a rarefaction curve calculated during the analysis (Chabal, 1994, 1992). In this case, Davasse (1989) suggests analyzing 120 charcoal fragments for ten identified taxa, or 60 fragments for five taxa. For the Chailluz survey, the identification was carried out using the variation in taxa proportions, which is less influenced by the appearance of a rare taxon, and much more appropriate for the aim of the study (Rouaud, 2013). When the taxa proportions were stable, the identification was stopped. The results obtained with the two methods were similar in the present study.

Identification of the taxa was performed using a reflection optical microscope (Vernet, 1973) Leitz Laborlux 12 ME ST, on freshly broken surfaces using reference keys for comparison (Schweingruber, 1990a, 1990b).

3.6 Botanical survey

To compare the results of the charcoal analysis of CH29 and CH30 with the current vegetation and to identify possible differences in the evolution of the forest's composition, a

botanical survey was performed at the same forest site in 7 areas of 1 to 2 hectares around the platforms. Each area contains sections (14 to 48) of 25 m². Within each section (except for area 4), vegetation was recorded in two strata: the dominant tree stratum and the shrub stratum. Results give the presence/absence of a species in the area and represent the number of sections in which the species is present.

3.7 Statistical analysis

To compare spectra of the platforms and to reveal differences between spectra, the calculation of dissimilarity distances is preferred (Legendre and Legendre, 2012). The application conditions permit to define the distance to use. In the case of this study these conditions are:

- Samples are compared pair to pair and not with a theoretical value (mode Q).
- The analysis is asymmetric (the non-identification of a species in a sample does not mean that the species is not present in the layer).
- Descriptors are quantitative (the number of fragments per species).
- Data are raw abundances and not normalized.
- Fragments have been selected randomly in samples and rare species have the same importance as abundant species.

With these conditions, the calculation of the Hellinger distance appears to be the correct dissimilarity distances to use (Legendre and Legendre, 2012). Its expression highlights differences between spectra and the greater the distance, the greater the difference between spectra.

4. Results and discussion

4.1 Charcoal kiln dating

Of the 46 dates, only one (CH17) is ascribed to the mid-15th century and clearly corresponds to an earlier period than the others. Otherwise, all the radiocarbon dates encompassed a period from the mid-17th century until present (**table 3.1**), roughly 250 years. The dates after 1900 have been excluded from the study, because it is historically documented by local written archives that in the forest of Chailluz charcoal has been produced in metallic furnaces since the end of the 19th century, and no longer on platforms (**Fruchart, 2014**).

Based on the radiocarbon dating results, long-term reemployment of the platforms is not discernible, and the 15th-century date obtained for CH17 appears to be an exception. This single piece of evidence is too weak to infer possible charcoal production at the end of the Middle Ages.

However, the reuse of platforms in the short-term, on the 250-years period (between the second half of the 17th and the end of the 19th century) remains possible. However, the probability distribution on the calibration curve does not enable periods of use to be identified, since the curve shows a plateau from the mid-17th century onwards, making the platform dates highly inaccurate. Moreover, the apparent gap of use in data around 1800 is clearly contradicted by the Cumulative Probability Function (CPF), which suggests that this period cannot be excluded (**Chiverrell et al., 2011; Magny, 2013; Michczynska and Pazdur, 2004**) (**Figure 3.3**). For instance, a repetition of charcoal production on one platform following the known practice of short rotations of coppices (20-30 years: **Duhamel du Monceau, 1761; Marié de L'Isle, 1835**) is compatible with the radiocarbon dating results.

Historical data evoke several hypotheses on phases of use in the 250-years period. The wood shortage during the 18th century in Besançon led to several restrictions: in 1763 a law prohibited charcoal making in the forest of Chailluz and more generally, prohibited the installation of furnaces on Besançon's territory (**Dianin, 1995**).

Furthermore, the forest of Chailluz possessed a "reserve stand" that was active from 1721 to 1893 (**Dianin, 1995; Fruchart, 2014**). The principle of a 'reserve stand' was set up in 1669 by Colbert, minister of Louis the 14th. The reserve stand (named "quart de réserve" in French) was a forest plot with a surface equivalent to one quarter of the total surface of the forest, where timber harvesting was excluded from the forest management plan (usually planned over a 30-years period). Harvesting in the reserve demanded prior royal permission. The reserve stand could grow trees evolving in high forest, specifically intended for shipbuilding. The reserve was also a potential economic resource that could be used for exceptional expenses (**Viney, 1953**). In the forest of Chailluz, two timber harvests were authorized in the reserve stand during the 18th century: the first harvest took place between 1739 and 1747, and the second between 1775 and 1784 (**Fruchart, 2014**). Based on this historical data, charcoal production in the forest of Chailluz' reserve stand may have happened during these two timber harvests. This could explain the higher density of platforms in this zone, in comparison with the rest of forest. Eventually, the platforms may also have been used before the reserve stand was settled (1721). Nevertheless, for all these historical hypotheses, we must remain cautious, because it is debatable whether rules and prohibitions were well respected

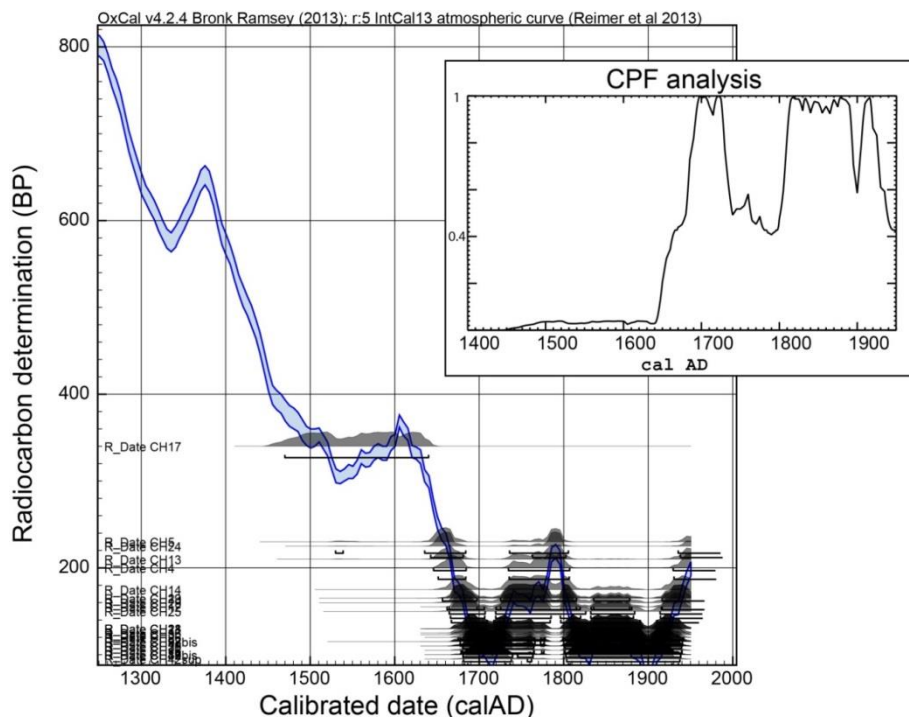


Figure 3.3 : Radiocarbon dates of platforms on the calibrated curve.
On the right: CPF analysis on radiocarbon dates.

4.2 Magnetic susceptibility (MS) on CH29 and CH30

Volumetric MS values on the platforms range from $200 \cdot 10^{-6}$ SI units (International system units) to $700 \cdot 10^{-6}$ SI units, compared to those of unburnt soil which do not exceed $100 \cdot 10^{-6}$ SI units (Boulvain et al., 2010; Clark and Emerson, 1991; Le Borgne, 1955). For both platforms, the MS signal is lower in the middle of the platform than at the periphery (from $300 \cdot 10^{-6}$ to $350 \cdot 10^{-6}$ units), even if the signal seems to be masked down the slope on platform CH29 due to colluvium. In comparison, another study on an experimental charcoal kiln did not find lower values in the middle of the platform, and volumetric MS values did not exceed $240 \cdot 10^{-6}$ SI units (Powell et al., 2012).

The MS measurements on the surface of CH29 and CH30 attest to burnt soil (**figure 3.4A**) and correspond to the existence of charcoal kilns in the past. The lower MS signal in the central part of CH29 and CH30 might be explained by the behavior of the signal with temperature. Indeed, the MS value increases slowly until 400°C , and more rapidly to 600°C (Hopkinson peak: Le Borgne, 1960). In an oxidizing context, the MS value could decrease. This decrease could be due to the transformation of maghemite or magnetite into hematite, which is less magnetic than the former iron oxide (Marmet, 2000; Petronille, 2009). In light of this information, and given the temperature reaching up to 840°C in the experimental charcoal kilns of Paradis-Grenouillet (2012) at the base of chimneys, it is possible that the “low” MS signal values measured in the central part of platforms CH29 and CH30 are caused by temperatures $> 600^\circ\text{C}$ (with transformation of maghemite and magnetite into hematite), in the chimney of the charcoal kilns. A physicochemical survey could be performed on the platforms CH29 and CH30 to highlight the minerals present and thus, the different redox mineral’s transformation during combustion. In the case reported by Powell (Powell et al, 2012), the homogeneous MS signal measured on the surface of the platform would result

from lower and more even temperatures of the soil (less than 200° C) during carbonization. Thus, the MS signal measured at the surface is probably useful to globally determine the temperatures attained during past carbonization processes, and, therefore, maybe provides interesting information on techniques employed to build the kilns. Thus, the differences of the temperature to the ground obtained from experimental kilns and reported by [Paradis-Grenouillet \(2012\)](#) and [Powell \(Powell et al., 2012\)](#) might be explained, at least partially, by differences in the techniques used to build the kilns. Photographs of the kilns, taken in both publications at the beginning of their construction, show differences in the way chimneys are erected. Consequently, it is possible that the differences in the MS signal to the surface measured in our case, and in the case reported by Powell, correspond *inter alia* to distinct techniques of building the kilns. However, the case reported by Paradis-Grenouillet highlights high temperature variability between her three kilns built with the same technique. Another hypothesis could possibly explain the variations in MS signal values we measured on the platforms CH29 and CH30, in relation to charcoal workers' practices during the unloading of the kiln. The MS signal values are measured on a heterogeneous volume composed of the burnt coverage, burnt particles *in situ* and charcoal particles. This mixing could also explain variations in the MS signal that we measured on platforms. To recover the charcoal, burners dragged it from the center to the periphery of the platform to allow the coals to cool. This could have contaminated the subsoil in mixing burnt and unburnt clays, and may explain the lower MS signal in the center of the platform. Moreover, the higher MS signal around the center of the platform could be caused by soil compaction because of trampling around the chimney.

MS measurements undertaken on profiles ([Figure 3.4B](#)) show a saw tooth pattern with high-frequency variation which is not significant, as calculated for 6 measurements per 0.5 cm of each platform. The MS peak observed at 13 cm depth in the CH30 profile is a local anomaly found solely in this pit. It could correspond to the close presence of a metal object. Regardless, we observe a similar pattern with a low-frequency variation which is significant for both platforms. This signal should however be confirmed with additional measurement on other charcoal platforms to ensure our understanding. For both platforms, MS values are the lowest in the deepest part of the structure's stratigraphy, around $550 \cdot 10^{-6}$ SI units for CH30 and $350 \cdot 10^{-6}$ SI units for CH29 (deeper than 25 cm for CH30 and 30 cm for CH29). These lowest values matches with a well visible change in soil color (less dark than the upper soil layers). Near the surface (0 to 7-8 cm), MS signal values (around $600 \cdot 10^{-6}$ SI units on the surface) are slightly higher than those measured in the deepest parts of the profile. Between 8-25 cm for CH30 and between 7-30 cm for CH29, MS signal values are notably higher (with values around $1100 \cdot 10^{-6}$ SI units for CH30 and $1000 \cdot 10^{-6}$ SI units for CH29), around twice those of the lowest MS signal values measured in the deepest part of the profiles. These higher MS signal values could be indicators of soil containing clays transformed by carbonization.

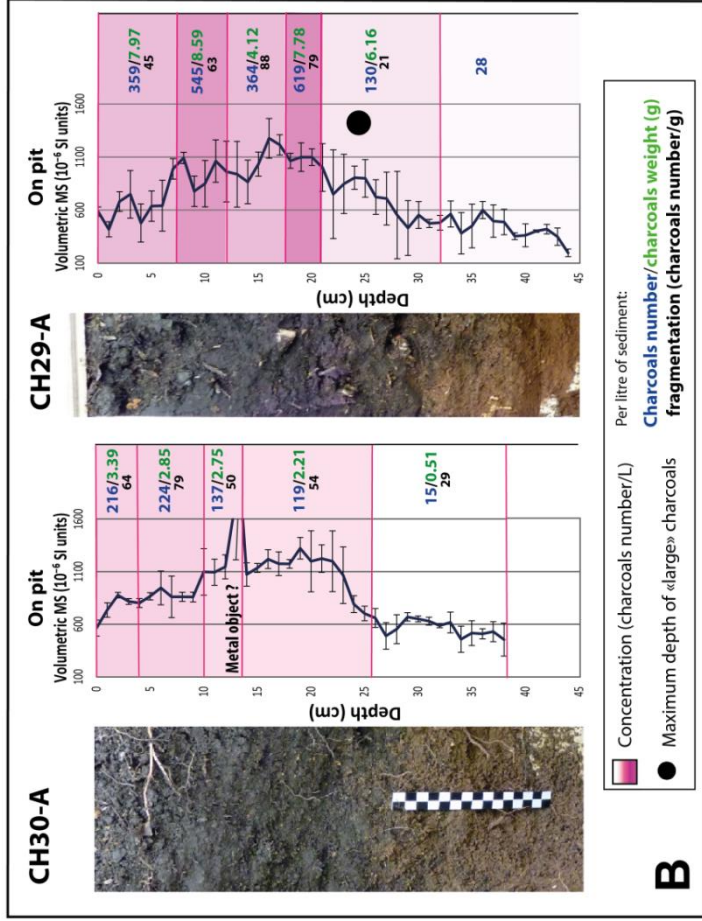
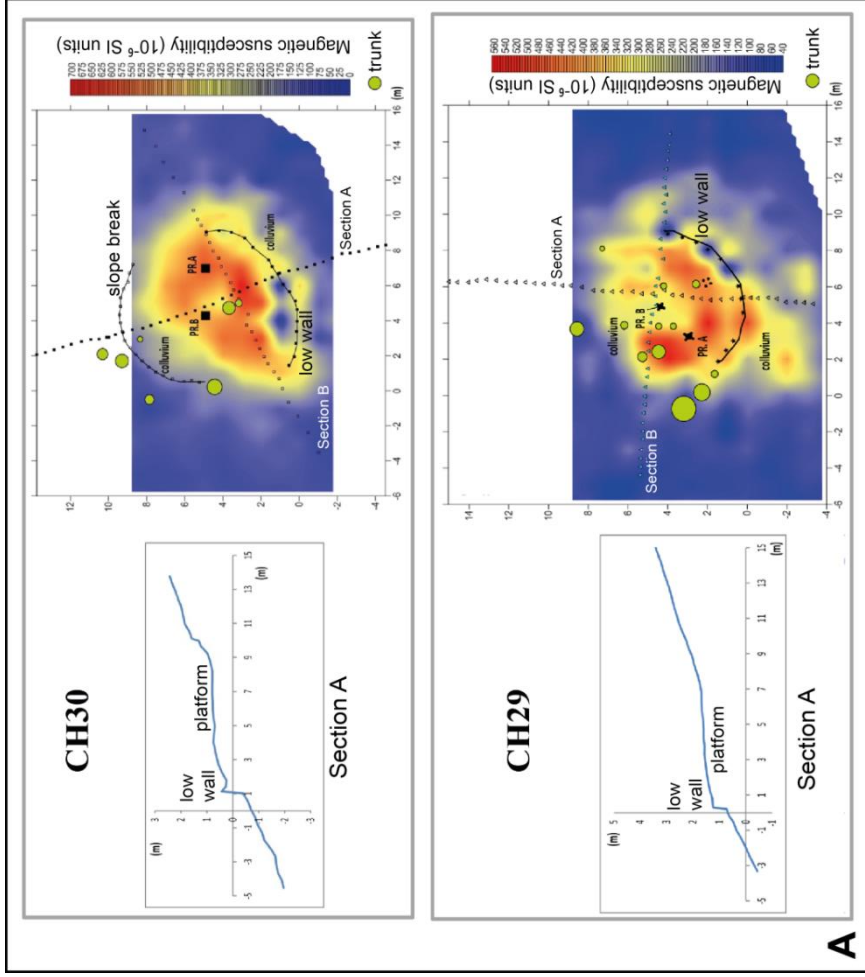


Figure 3.4 : Magnetic susceptibility survey on platforms CH29 and CH30. A: On surface. The topography was measured and represented on the left part. / B: On profil

Even though charcoal particles can move down one meter in a soil profile during ~500 years (Carcaillet, 2001), the charcoal remains we observed in the platforms of the forest of Chailluz were often of large size, and none of them had moved down to the lower layers corresponding to the change in soil color (at 25-30 cm depth). These observations suggest that the charcoal-rich horizon we have identified corresponds to the actual depth of use of the platform. Thus, because of the significant thickness of this horizon (thick of 20-30 cm), we assume a repeated production on the platforms, as it seems improbable that a unique charcoal production generated charcoal waste on several dozens of centimeters, which was also concluded in other studies (Davasse, 2000; Rouaud, 2013). A future experiment on two platforms will be conducted to better understand the stratigraphy, the first one known to be used twice per year during 15 years, the second only one time. Furthermore, experiments based on local traditions in the region assume the kiln to be covered by a 5–10 cm thick clay cap, which is staying on the platform between two carbonizations and partly reused over time for the next ones.

Some surveys and ancient technical books support this interpretation. For instance, Marié de l'Isle (1835) prescribed the reuse of platforms whenever possible because charcoal production caused damage to the terrain. In a Mediterranean context, a study about charcoal burner traditions in Languedoc (Southern France) specified the reuse of platforms 4 to 5 times a year every 20 years to facilitate vegetation regeneration (Battesti, 1992). Battesti suggested a possible reuse of burnt soil for the following pyrolysis because it is less porous than unburnt soil, and thus carbonization is easier to control. This practice is described in a charcoal burner's testimony in Franche-Comte during the 19th century (Bouchey, 1969). Lastly, an unpublished historical source dating to the 18th century describes the earthwork by the wood buyer working for the blast furnace in Vy-le-Ferroux (45 km north of Besançon). The earthwork is described as a platform for only one carbonization.

This discussion can be enhanced by the observation of a homogeneous stratigraphy along all the platform profiles of Chailluz, like in several other surveys in which authors argue for a mixed horizon (Deforce et al., 2013) and reveal a systematic reuse of the platform over a short time, during a singular period (Fabre, 1996). In the same way, studies prove that a stratigraphy showing charcoal-rich layers correspond to an occasional reuse of the platform, with distinguished periods between layers (Dubois et al., 1996). Furthermore, radiocarbon-dated layers and taxa identification spectra are significantly different (Nelle, 2003). The concentration of charcoal present in the soil (number and weight of charcoal fragments per liter of sieved sediment) appears as two layers of high values in the CH29 profile (3-5 cm thick, at 20 cm and 10 cm depth). A comparison between MS values and the concentration of charcoal on this profile shows no correlation. Therefore, the higher values of the MS signal between 7 cm and 30 cm in CH29 do not match the higher densities of charcoal in the soil. However, charcoal concentrations in profiles of charcoal kiln platforms could give information about the intensity of charcoal burning. It can be assumed that for a constant intensity of charcoal burning on a platform (i.e. every 20 years), the constant thickness of the disturbed soil per reuse could contain charcoal remains of a constant number (N) of previous carbonizations. This could suggest homogeneous charcoal concentrations along the profile (figure 3.5A). In our study, charcoal concentrations are higher for two layers of CH29, which could suggest a greater number (n) of carbonizations represented in the disturbed soil for one use (n>N), and thus, a higher intensity of charcoal burning (i.e. < 20 years between two uses; figure 3.5B). It is also interesting to note the difference in charcoal concentration between CH29 (mean: 6.9 g/L) and CH30 (mean: 2.8 g/L), and the quite similar low frequency MS signal trends of both profiles. Differences in charcoal concentration may indicate charcoal

sensitivity to environmental conservation between platforms and/or variations caused by differences in the charcoal burner's skills; the MS signal does not show similar alterations.

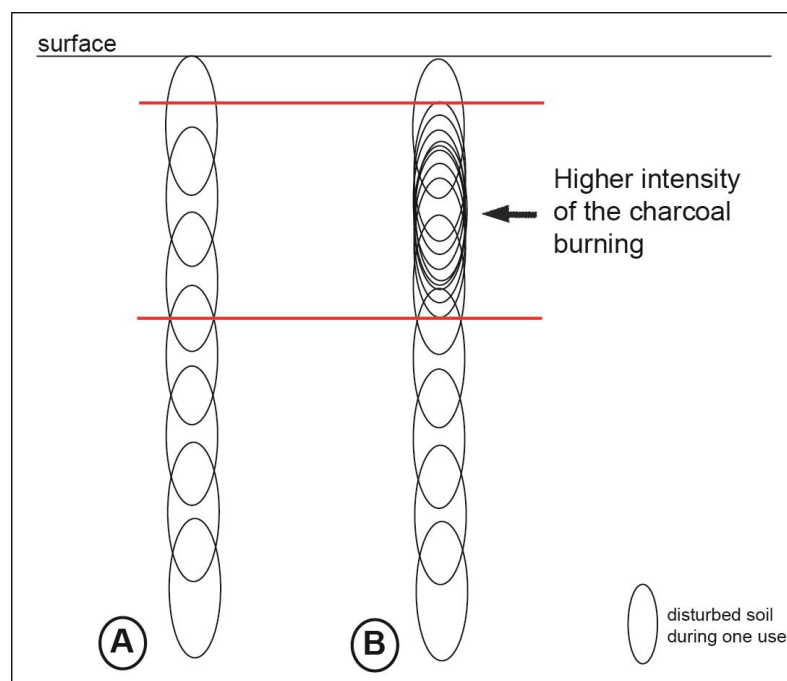


Figure 3.5 : Hypothetical diagram of the disturbed soil and residual charcoal remains during the reuse of a platform for the charcoal production. **A:** with constant intensity of use. **B:** with variable intensity of use.

4.3 Charcoal analysis of 11 charcoal kilns

20 taxa were elucidated through the combined results of the analysis realized on the charcoal-rich layers of 11 platforms. *Carpinus betulus*, *Quercus sp.* and *Fagus sylvatica* dominate (**figure 3.6**). The significant number of taxa identified was likely close to the composition of the ancient vegetation and similar to those found in other studies dealing with a charcoal kiln context (Davasse, 2000; Knapp et al., 2013; Paradis-Grenouillet, 2012; Rouaud, 2013). From a spatial viewpoint, the densities of platforms in the forest of Chailluz are inferior to one feature per three hectares for more than 80 % of the platforms, and below one feature per hectare for nearly half of the platforms (Fruchart, 2014). Therefore, because platforms are close to each other in the forest of Chailluz, we assume that the wood harvested for charcoal production was certainly carbonized close to the place where it had been cut, rather than being transported at distance for carbonization. In parallel, historical sources (in Mediterranean context: Battesti, 1992) indicate that the wood supply for one charcoal kiln covered an area of 100 m × 100 m around the platform, which historically, confirms the practice of carbonization in the harvesting zone. Thus, we infer that the anthracological spectra of a platform likely correspond to the vegetation which grew in proximity to the platform. We then compared and contrasted the anthracological spectra of platforms to a present-day botanical inventory in their vicinity. We deduced that it was possible to compare the past and present vegetation, and hence gain insights into the vegetation change over the last centuries.

A presence/absence botanical inventory was carried out in the same forest site of CH29 and CH30 (**table 3.2**). *Acer sp.*, *Tilia sp.* and *Sorbus sp.* are well represented in the anthracological spectra and in the spectra obtained in the inventory of current vegetation. These species fit with current forest site conditions, namely, a shallow soil on a well-exposed slope where *Quercus sp.* is not abundant. However, light demanding taxa (*Amelanchier ovalis/Sorbus chamaemespilus/Cotoneaster/Mespilus germanica* which are heterogeneous type II and with semi-ring porous wood, and *Laburnum anagyroides* in particular) seem much more abundant in the platform spectra than in the current vegetation inventory. Currently, shade-tolerant species (*Ilex aquifolium* in particular) are much more abundant. These differences could indicate a more open forest structure when the platforms were in use, in contrast to today. Indeed, fruit trees (including cherry trees, apple trees, pear trees, chestnut trees and hazel trees) are cited in historical texts about the forest of Chailluz during the 16th and 17th centuries (**Muller, 1999**). Lastly, *Fraxinus excelsior* and *Ulmus sp.* are abundant current species that are not found in the anthracological spectra of the platforms. This could suggest the presence of competitive products to charcoal at the time of the platforms and consuming these species for more specific uses. It is well known that the forest of Chailluz was exploited for stakes to support vines, wooden wheels or carpentry for instance (**Corvol, 2002; Fruchart, 2014; Royer et al., 1988**).

To compare spectra, the Hellinger distance was calculated (**Legendre and Legendre, 2012**). The greater the distance, the more important the difference between spectra. **Table 3.3** presents all the distances calculated between the different spectra. Colored cells correspond to platforms that belong to the type of forest site as described in 2.2 (yellow for the type with shallow soil, blue for the type with moderately deep soil, green for the type with deep soil). Grey cells correspond to peculiar cases. The smallest distances are observed between spectra of the same current forest type, supporting the hypothesis that the forest management and thus site conditions didn't change much over time. CH38 appears as an exception: it corresponds better with another current forest type than the one in which it is located today, a moderately deep soil (mid-grey on **figure 3.2** and blue on **table 3.3**). The spectra of CH38, which is in the current forest type with a moderately deep soil (mid-grey on **figure 3.2** and blue on **table 3.3**), resemble the spectra of CH30, which is in the current forest type with shallow soil (light grey on **figure 3.2** and yellow on **table 3.3**). This might be explained by the location of platform CH38 at the foot of the slope, with a similar exposure to that of CH29 and CH30. The spectra of CH45 fit quite closely with those of CH34, which is in the same current forest type, but with greater distance (0.54) compared with the other values. This platform seems to be special and belongs to a peculiar forest site that corresponds with the "Tilia area".

The projection of spectra on the map of current forest types (**figure 3.2**) also appears to confirm the hypothesis of stable site conditions over time. CH31, CH32, CH34 and CH41 share analogies with the current forest type in which the platforms belong to (deep subsoil with cherts on clays). A high proportion of *Quercus sp.* and *Fagus sp.* is also well represented. CH45 has a peculiar composition with a high proportion of pioneers (*i.e. Populus sp.*) and post-pioneer species (*i.e. Tilia sp.*). This also does correspond to the current forest site in a *Tilia sp.* area. CH29 and CH30 are located on the forest's slope, where *Carpinus betulus* is abundant today with light demanding species such as *Sorbus sp.* The spectra of CH29 and CH30 correspond with this composition even though the light demanding species appear to have been more abundant in the past. Finally, CH36, CH42 and CH43 also match with the current forest type they are in, namely a mature stand comprising *Carpinus betulus*, *Fagus sylvatica* and post-pioneer species on a moderately deep soil of a plateau.

Consequently, the charcoal spectra found in the platforms suggest a change in forest management between today and the Modern Period: forest structure was probably quite different and corresponded to a more opened landscape than today. However, a correlation between charcoal species frequencies, site conditions and the recent vegetation is discernible, proving a relative stability of site conditions over the last three centuries. Similarly, a correlation between platforms spectra and site conditions was observed in the Black Forest (south-western Germany) and in the Vosges (north-eastern France) for the Middle Ages and Modern Period. In these cases, *Fagus*, *Picea* and *Abies* dominate, and these main species found in charcoal spectra seem to fit with the environmental offering and not correspond to taxa selection (Ludemann, 2010, 2003; Ludemann et al., 2004; Nölken, 2005). This interpretation could be supported with a future estimation of the stem diameters used in charcoal production.

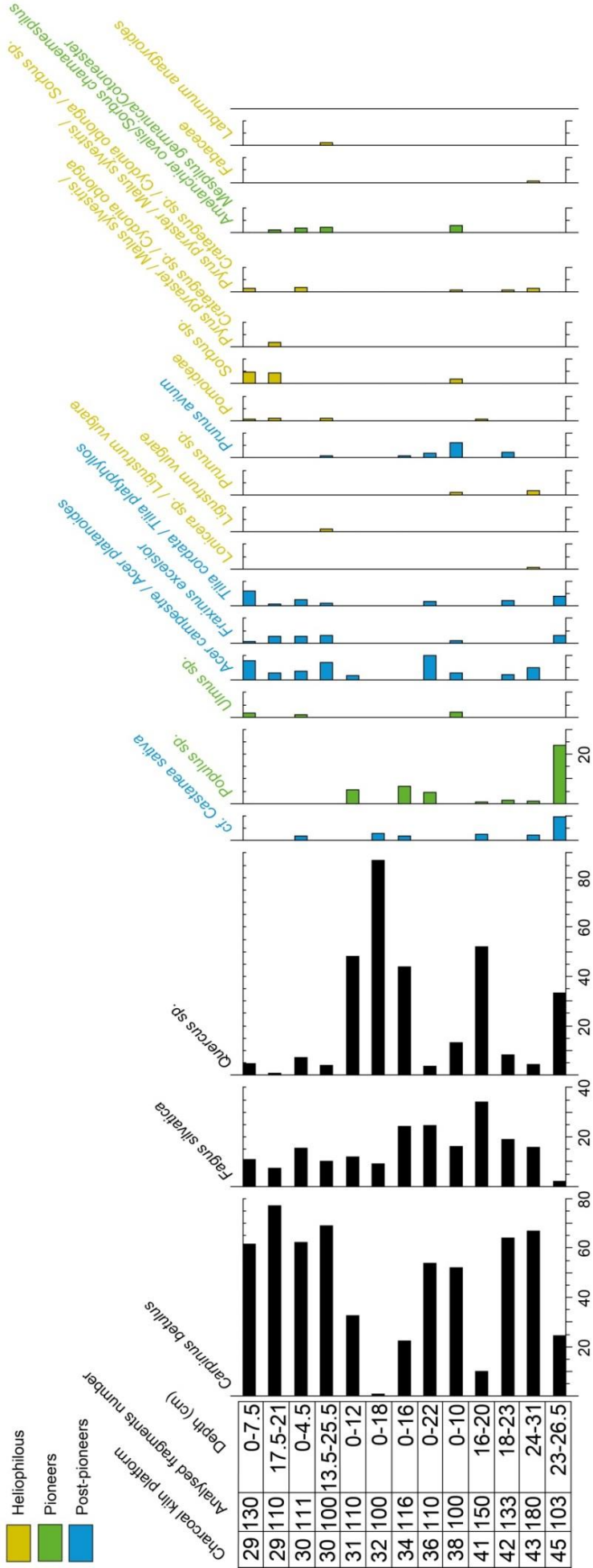


Figure 3.6 : Charcoal analysis on charcoal kiln platforms of Chailluz.

Table 3.2 : Botanical survey around platforms CH29 and CH30. Counting is expressed in presence/absence of a species present in the prospected area.

Areas :		1	2	3	4	5	6	7	1 to 7
Statement number :		48	14	33	0	24	24	48	191
Dominant tree stratum	<i>Carpinus betulus</i>	67	57	58		58	42	83	64
	<i>Tilia platyphyllos</i>	58	29	45		33	21	33	40
	<i>Fraxinus excelsior</i>	42	57			58	38	42	37
	<i>Ulmus glabra</i>	63	7	21		4	21	27	30
	<i>Acer campestre</i>	23				71	21	27	24
	<i>Fagus sylvatica</i>	25	50	39			17	17	23
	<i>Quercus petraea</i>	4	29			13	4	10	8
	<i>Acer opalus</i>		7	12			33		7
	<i>Ilex aquifolium</i>	17				4	4	6	7
	<i>Acer pseudoplatanus</i>	2	7	9				6	4
	<i>Prunus avium</i>			6			4	2	2
	<i>Sorbus torminalis</i>		14					2	2
	<i>Sorbus aria</i>						4	4	2
	<i>Corylus avellana</i>	2		3				2	2
	<i>Acer platanoides</i>	2							1
	<i>Populus tremula</i>	2							1
Statement number :		48	14	33	45	24	24	48	236
Dominated tree stratum	<i>Ilex aquifolium</i>	17		39	58	38	54	56	50
	<i>Crataegus laevigata</i>	4	50	33	18	58	54	27	36
	<i>Fagus sylvatica</i>	2	29	12	29		13	13	16
	<i>Ulmus glabra</i>	10	7	12	13	4	21	15	15
	<i>Tilia platyphyllos</i>	6	14	27	7	4	8	10	13
	<i>Ribes alpinum</i>	21	50			4		13	13
	<i>Crataegus monogyna</i>	27		6	2	4		2	9
	<i>Carpinus betulus</i>	8		12	9			6	8
	<i>Lonicera xylosteum</i>	8		9	7	13		2	7
	<i>Ligustrum vulgare</i>	21				4	4	4	7

Table 3.3 : Hellinger distance calculated between anthracological spectra of platforms. Colors correspond to the different forest

	CH29 sup	CH29 inf	CH30 sup	CH30 inf	CH31 sup	CH32 sup	CH34 sup	CH36 sup	CH38 sup	CH41 inf	CH42 inf	CH43 inf
CH29 inf	0.36											
CH30 sup	0.34	0.42										
CH30 inf	0.40	0.35	0.33									
CH31 sup	0.71	0.79	0.64	0.69								
CH32 sup	1.12	1.22	1.03	1.13	0.62							
CH34 sup	0.81	0.88	0.69	0.79	0.28	0.57						
CH36 sup	0.45	0.53	0.44	0.41	0.61	1.10	0.66					
CH38 sup	0.47	0.51	0.40	0.42	0.59	0.97	0.63	0.48				
CH41 inf	0.89	0.99	0.78	0.89	0.44	0.43	0.29	0.81	0.75			
CH42 inf	0.40	0.48	0.34	0.38	0.54	1.02	0.59	0.25	0.39	0.74		
CH43 inf	0.46	0.48	0.35	0.43	0.62	1.07	0.68	0.38	0.47	0.81	0.33	
CH45 inf	0.87	0.92	0.77	0.87	0.56	0.79	0.54	0.81	0.85	0.71	0.76	0.80

5. Conclusions

The analysis of 11 charcoal platforms in the forest of Chailluz has shown that these archaeological objects can help characterizing charcoal production and its impact on vegetation. Platforms can be analyzed with the objective of identifying possible reuses and try to evaluate intensity of charcoal production. Identifying reuse is however challenging and hence, defining intensity of production is difficult to assess. In our case, radiocarbon dates support a relatively short period of use over two and a half centuries between the middle of the 17th century and the end of the 19th century. These dates testify of a probable intense activity of charcoal production during the Modern Period in the forest of Chailluz, which was not an obvious statement to infer a priori, because iron industry is historically proved absent in Besancon during the same period. Moreover, no solid evidence of a medieval charcoal production was found, which could invalidate the hypothesis of a production over a very long period. Unfortunately, 14C calibrated dates are not precise enough to identifying phases or possible frequencies of use during the 17th – 19th centuries because of the plateau of the calibration curve for the Modern Period, but several hypotheses about short-run use can be proposed based on historical sources and literature. It includes a possible charcoal production in the ‘reserve stand’ of Chailluz during the 18th century, which draws, apart from the questioning related to iron industry, some new historical perspective on forest management during this period. Indeed, ‘reserve stands’ are mainly known to have been devoted to high forest woodland, rather than serve an economy of wood based on byproducts.

Several characteristics of the platforms we studied as well as some historical sources may indicate reuse of platforms over a short-term: historical sources suggest a periodic reuse of platforms (4 to 5 times per year every 20 years corresponding to coppices rotation: Battesti, 1992; Duhamel du Monceau, 1761; Marié de L’Isle, 1835). In Chailluz, a significant thickness of the charcoal-rich horizon (from 20 to 30 cm) argues for reuse, as well as the low frequency trend of the MS signal in profiles attesting use of platforms for charcoal production. In the same way, possible mixing of layers revealed by a homogeneous stratigraphy in which two different radiocarbon dates were obtained in one platform (CH17) is also an indicator for the reuse of platforms. Concentrations of charcoal in profiles could be an indicator for the intensity of charcoal production. The two layers of high charcoal concentrations of CH29 could suggest a higher intensity of the practice at these moments than in the other parts of the profiles. MS signal on surface appears like an indicator of temperatures reached during carbonizations and therefore, different techniques employed to build the kiln. Charcoal remains in the platforms are indicators of the former vegetation. In our study, 20 taxa were identified in the platforms and compared to a present-day botanical inventory, leading to the conclusion that the vegetation used to contain a much higher proportion of light demanding species and pioneers, and much less shade-tolerant species. This proves a more opened woodland cover than nowadays, but without change of site conditions: dominant species found through charcoals analysis always correspond to the current forest type where the platforms are located. An upcoming study focusing on the stems’ diameters used for the charcoal production will provide more information on the wood used in kilns, and hopefully give some additional data about the past forest of Chailluz.

Eventually, even though it proved impossible to accurately date the platforms, they were used when the iron industry was a booming sector in Franche-Comte. Linking charcoal production in the forest of Chailluz to the iron industry is however unsure, and we cannot assess a possible impact of the iron industry on the vegetation. In the future, we would like to compare the results of this study with other forests close to Besancon, historically known to

have been used exclusively for the iron industry in the 18th-19th centuries. A comparison would perhaps highlight differences in platforms contents and stratigraphy, that could be put in perspective with specific historical archives that exist, and confirm the assumption deduced from Besancon's historical archives, that the forest of Chailluz was used by citizens for a variety of purposes, domestic use and crafts, for instance.

References

- Arnould, E., 1978. Métallurgie au bois et utilisation de la forêt. *Revue forestière Française* 6, 459–477. doi:10.4267/2042/21254
- Badal-Garcia, E., 1987. Méthode de prélèvement et paléoécologie du Néolithique d'après les charbons de bois de "La Cova de les Cendres" (Alicante, Espagne)". *Wood and Archaeology, First European Conference* 231–243.
- Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 199–214.
- Battesti, V., 1992. Une charbonnière expérimentale. *university Montpellier II, Montpellier*.
- Benoit, P., Cailleaux, D., 1991. Moines & métallurgie dans la France médiévale. Association pour l'édition et la diffusion des études historiques.
- Bépoix, S., 2010. Une cité et son territoire: Besançon 1391, l'affaire des fourches patibulaires. *Presses universitaires de Franche-Comté* 71.
- Bouchev, E., 1969. le charbonnier dans les bois. *Folklore comtois, Besançon*.
- Boulvain, F., Da Silva, A., Mabile, C., 2010. Magnetic susceptibility correlation of km-thick Eifelian–Frasnian sections (Ardennes and Moravia). *Geologica Belgica* 13, 309–318.
- Bully, S., Bully, A., Pactat, I., 2015. Des traces d'artisanat dans les monastères comtois du haut Moyen Âge. *Bulletin du Centre d'études médiévales d'Auxerre, special issue* 8. doi:10.4000/cem.13674
- Carcaillet, C., 2001. Are Holocene wood-charcoal fragments stratified in alpine and subalpine soils? Evidence from the Alps based on AMS 14 C dates. *The Holocene* 11, 231–242. doi:10.1191/095968301674071040
- Chabal, L., 1994. Apports récents de l'anthracologie à la connaissance des paysages passés: performances et limites. *Histoire & mesure* 9, 317–338.
- Chabal, L., 1992. La représentativité paléo-écologique des charbons de bois archéologiques issus du bois de feu. *Bulletin de la société botanique de France Actualités Botaniques* 139, 213–236.
- Chiverrell, R.C., Thorndycraft, V.R., Hoffmann, T.O., 2011. Cumulative probability functions and their role in evaluating the chronology of geomorphological events during the Holocene. *Journal of Quaternary Science* 26, 76–85. doi:10.1002/jqs.1428
- Claerr-Roussel, C., 2000. Le procédé comtois d'affinage du fer: naissance et mise en place de nouvelles structures de travail au XVIIIe siècle, in: *Minaria Helvetica. La Forge de Montagney - Franche-Comté. Bulletin de la Société Suisse d'Histoire des Mines, Basel*, pp. 105–115.
- Clark, D.A., Emerson, D.W., 1991. Notes on rock magnetization characteristics in applied geophysical studies. *Exploration Geophysics* 22, 547–555. doi:10.1071/EG991547
- Corvol, A., 2002. Forêt et vigne, bois et vin : XVIe-XXe siècle. *L'Harmattan, Paris*.
- Crew, P., Mighall, T., 2013. The fuel supply and woodland management at a 14th century bloomery in Snowdonia: a multi-disciplinary approach, in: *Humphris, J., Rehren, T. (Eds.), The World of Iron. London*, pp. 473–482.
- Davasse, B., 2000. Forêts, charbonniers et paysans dans les Pyrénées de l'est du Moyen Age à nos jours: une approche géographique de l'histoire de l'environnement. *Geode, Toulouse*.
- Davasse, B., 1989. Restitution de la dynamique historique du paysage forestier des Pyrénées ariégeoises par l'anthracanalyse des charbonnières, in: *Bioceneses D'altitude 3. Montagnes d'Europe. Centre Pyrénéen de Biologie et Anthropologie des Montagnes, Pau*.
- Davasse, B., Galop, D., 1990. Le paysage forestier du haut Vicdessos (Ariège): l'évolution d'un milieu anthropisé. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest* 61, 433–457.

- Deforce, K., Boeren, I., Adriaenssens, S., Bastiaens, J., De Keersmaeker, L., Haneca, K., Tys, D., Vandekerckhove, K., 2013. Selective woodland exploitation for charcoal production. A detailed analysis of charcoal kiln remains (ca. 1300-1900 AD) from Zoersel (northern Belgium). *Journal of Archaeological Science* 40, 681–689. doi:10.1016/j.jas.2012.07.009
- Deforce, K., Haneca, K., 2015. Tree-ring analysis of archaeological charcoal as a tool to identify past woodland management: The case from a 14th century site from Oudenaarde (Belgium). *Quaternary International* 366, 70–80. doi:10.1016/j.quaint.2014.05.056
- Delpech, R., Dumé, G., Galmiche, P., Timbal, J., 1985. Vocabulaire: typologie des stations forestières. Ministère de l'agriculture, Direction des forêts.
- Demard, J.-C., 1980. L'utilisation du bois dans la tradition paysanne et artisanale comtoise. *Revue Forestière Française Special issue S*, 281–300. doi:10.4267/2042/21469
- Dianin, S., 1995. Les forêts à Besançon au XVIIIème siècle (Master's thesis). Université de Franche-Comté.
- Dubois, C., Metailie, J., Izard, V., 1996. Archéologie de la forêt charbonnée: questions et méthodes, illustrées par l'exemple du site de Lercoul (Ariège), in: *XVIIè Rencontres Internationales D'archéologie et D'histoire d'Antibes*. pp. 525–540.
- Duhamel de Monceau, H.L., 1774. Description des arts et métiers, faits ou approuvés par Messieurs de l'Académie royale des Sciences. Art du charbonnier, Desaint et. ed. Paris.
- Fabre, L., 1996. Le charbonnage historique de la chênaie à Quercus ilex L. (Languedoc, France): conséquences écologiques . (PhD thesis). Université de Montpellier 2.
- Faiseau-Lavanne, J.-B.-F., 1829. Recherches statistiques sur les forêts de la France : tendant à signaler le danger qu'il y aurait pour elles d'ouvrir nos frontières aux fers étrangers. Kilian, A. J., Paris.
- Fiétier, R., 1973. Recherches sur la banlieue de Besançon au Moyen Âge. Les belles lettres, Paris.
- Fiétier, R., Brelot, C.-I., 1977. Histoire de la Franche-Comté. Privat.
- Fohlen, C., 1982. Histoire de Besançon. Tome 2. De la conquête française à nos jours. Cêtre, Besançon.
- Forlin, P., Laurent, H., 2014. Exploiting local resources in a new economic frame : Iron ores and bloomeries in Franche-Comté (F) during the Early Middle Ages, in: Silvertant, J. (Ed.), *Research and Preservation of Ancient Mining Areas, 9th International Symposium on Archaeological Mining History (Trento)*. Yearbook of the Institute Europa Subterranea, Trento/Valkenburg de Geul, pp. 196–217. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Fruchart, C., 2014. Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours. (PhD thesis). Université de Franche-Comté.
- Fruchart, C., Daval, D., Daval, P., Bossuet, G., Dupin, A., Favory, F., Girardclos, O., Grosbois, J.-P., Josseron, J.-P., Laplaige, C., Mosca, P., Nuninger, L., Petit, M., Sordoillet, D., 2014. Besançon et environs (25). Prospection et validation de données LiDAR. Rapport annuel d'activité. Besançon.
- Gaiffe, M., Bruckert, S., 1985. Analyse des transports de matières et des processus pédogénétiques impliqués dans les chaînes de sols du karst jurassien. *Catena, special issue "Soils and geomorphology"* 6, 159–174.
- Hulin, G., Broes, F., Fechner, K., 2012. Caractérisation de phénomènes anthropiques par la mesure de paramètres magnétiques sur surface décapée : premiers résultats sur le projet Canal Seine-Nord Europe. *ArchéoSciences* 1, 61–70.
- Jacob, J.-P., Mangin, M., 1990. De la mine à la forge en Franche-Comté: des origines au XIXe siècle., Les Belles. ed. Annales littéraires de l'Université de Besançon, Besançon.
- Knapp, H., Robin, V., Kirleis, W., Nelle, O., 2013. Woodland history in the upper Harz

- Mountains revealed by kiln site, soil sediment and peat charcoal analyses. *Quaternary International* 289, 88–100. doi:10.1016/j.quaint.2012.03.040
- Laplaige, C., 2012. Comparaison de signaux (géophysique, LiDAR) utilisés dans l'étude des dynamiques anthropiques et naturelles (PhD thesis). Besançon.
- Laplaige, C., 2008. Etude des caractéristiques magnétiques de la séquence lœss- paléosols de Saint-Pierre-lès-Elbeuf (76) et prospection géophysique sur le site du Vieil-Evreux (27). University of Rennes.
- Lassus, F., 1968. Les établissements métallurgiques en Franche-Comté aux XVIIe et XIXe siècles (PhD thesis). University of Franche-Comté.
- Le Borgne, E., 1960. Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. *Annales de géophysique* 16, 159–195.
- Le Borgne, E., 1955. Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Annales de géophysique* 11, 399–419.
- Legendre, P., Legendre, L.F.J., 2012. *Numerical Ecology* (volume 24). Elsevier.
- Leroy, M., Mangin, M., Laurent, H., Boukezzoula, M., Raïssouni, B., 2000. La sidérurgie dans l'est de la Gaule. L'organisation spatiale de la production de l'Âge du Fer au haut Moyen Age. *Gallia* 57, 11–21. doi:10.3406/galia.2000.3206
- Ludemann, T., 2012. Airborne laser scanning of historical wood charcoal production sites—a new tool of kiln site anthropology at the landscape level., in: *SAGVNTVM EXTRA* 13. Wood and Charcoal. Evidence for Human and Natural History. Universitat de València, Valencia, pp. 247–252.
- 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, Palaeoecology* 291, 154–165. doi:10.1016/j.palaeo.2009.09.013
- Ludemann, T., 2003. Large-scale reconstruction of ancient forest vegetation by anthracology - A contribution from the Black Forest. *Phytocoenologia* 33, 645–666. doi:10.1127/0340-269X/2003/0033-0645
- Ludemann, T., Michiels, H.G., Nölken, 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, 283–292. doi:10.1007/s10342-004-0049-z
- Magny, M., 2013. Orbital, ice-sheet, and possible solar forcing of Holocene lake-level fluctuations in west-central Europe: A comment on Bleicher. *The Holocene* 23, 1202–1212. doi:10.1177/0959683613483627
- Marié de L'Isle, E.-B., 1835. *Manuel complet des marchands de bois et de charbons, ou Traité de ce commerce en général*. La librairie encyclopédique de Roret, Paris.
- Marmet, E., 2000. Cartographie à large maille de la susceptibilité magnétique du sol, pour une évaluation archéologique sur les grands traces (PhD thesis). Université de Paris 6.
- Marmet, E., Bina, M., 1999. Relationships between human activity and the magnetic properties of soils: a case study in the medieval site of Roissy-en-France. *Archaeological prospection* 6, 161–170.
- Michczynska, D., Pazdur, A., 2004. Shape analysis of cumulative probability density function of radiocarbon dates set in the study of climate change in the Late Glacial and Holocene. *Radiocarbon* 46, 733–744.
- Morin, D., 1993. Les systèmes d'exploitation du minerai de fer sédimentaire en Franche-Comté (XVI^e-XIX^e siècles) : Archéologie, Typologie et Dynamique des systèmes (PhD thesis). University of Franche-Comté.
- Muller, C., 1999. *La forêt de Chailluz. 1500-1674* (Master's thesis). Besançon.
- Namaalwa, J., Hofstad, O., Sankhayan, P., 2009. Achieving sustainable charcoal supply from

- woodlands to urban consumers in Kampala, Uganda. *International Forestry Review* 11, 64–78. doi:10.1505/ifor.11.1.64
- Nelle, O., 2003. Woodland history of the last 500 years revealed by anthracological studies of charcoal kiln sites in the Bavarian Forest, Germany. *Phytocoenologia* 33, 667–682.
- Nölken, W., 2005. *Holzkohleanalytische Untersuchungen zur Waldgeschichte der Vogesen* (PhD thesis). Freiburg university.
- Nuninger, L., Fruchart, C., Laplaige, C., Bas, C., Bépoix, S., Bossuet, G., Chenal, T., Crozet, A., Daval, D., Dupin, A., Fovet, E., Georges-Leroy, M., Girardclos, O., Grosbois, J.-P., Jossieron, J.-P., Nouvel, P., Opitz, R., Rossi, A., Ruffaldi, P., Thivet, M., Zimmer, C., 2015. Rapport d'activité au 31 octobre 2015. Chantier "Construction historique des espaces forestiers: dynamiques, ressources et patrimoine" (CHEF). Besançon.
- Nuninger, L., Fruchart, C., Opitz, R., 2010. LiDAR: quel apport pour l'analyse des paysages? *Bulletin AGER* 34–43.
- Opitz, R., Nuninger, L., Fruchart, C., 2015. Thinking topographically about the landscape around Besançon (Doubs, France)., in: Kluiving, S., Guttman-Bond, E. (Eds.), *Landscape Archaeology between Art and Science. From a Multi- to an Interdisciplinary Approach*. Amsterdam university press, pp. 395–412.
- Paget, D., A. Schmitt, 1992. *Catalogue des types de stations forestières des Avant-Monts jurassiens*. Ministère de l'Agriculture-Conseil Régional de Franche-Comté.
- Paradis-Grenouillet, S., 2012. *Etudier les forêts métallurgiques: analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. L'exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin* (PhD thesis). Université de Limoges.
- Petronille, M., 2009. *Contribution à la caractérisation du type d'occupation des sols à partir des propriétés magnétiques* (PhD thesis). Institut de physique du globe de paris - IPGP.
- Powell, A.J., Wheeler, J., Batt, C.M., 2012. Identifying archaeological wood stack charcoal production sites using geophysical prospection: Magnetic characteristics from a modern wood stack charcoal burn site. *Journal of Archaeological Science* 39, 1197–1204. doi:10.1016/j.jas.2011.11.005
- Praicheux, J., 1972. Un exemple d'aménagement périurbain: la forêt de Chailluz à Besançon. *Revue Géographique de l'Est* 12, 399–405.
- Py, V., Ancel, B., 2006. Archaeological experiments in fire-setting: protocol, fuel and anthracological approach. *Charcoal Analysis: New Analytical Tools and Methods for Archaeology BAR Intern*, 71–82.
- Raab, A., Takla, M., Raab, T., Nicolay, A., Schneider, A., Rösler, H., Heußner, K.-U., Bönisch, E., 2015. Pre-industrial charcoal production in Lower Lusatia (Brandenburg, Germany): Detection and evaluation of a large charcoal-burning field by combining archaeological studies, GIS-based analyses of shaded-relief maps and dendrochronological age determination. *Quaternary International* 367, 111–122. doi:10.1016/j.quaint.2014.09.041
- Rameau, J.-C., Mansion, D., Dumé, G., 2008. *Flore forestière française: plaines et collines* (volume 1). forêt privée française, Paris.
- Rameau, J.-C., Schmitt, A., Bidault, M., Gaiffe, M., 1980. Végétation et écologie des forêts comtoises, in: Numéro Spécial -La Forêt Comtoise. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle du Doubs et du Bulletin de l'association UNIVERS*, Besançon, pp. 80–116.
- Ramsey, C.B., 2013. *OxCal 4.2 manual*. Oxford.
- Rassat, G., Allée, P., Dieudonné-Glad, N., Bal-Serin, M.C., 2013. Searching for and studying charcoal production platforms: the utilization and implementation of LiDAR technology in charcoal-based archaeological studies (hearing). *Charbonnage, Charbonnier, Charbonnière*.
- Rassat, G., Toumazet, J.-P., Cerbelaud, F., Crouzevialle, R., Allée, P., Dieudonné-Glad, N.,

- Bal-Serin, M.-C., 2015. Le LiDAR : pour une histoire renouvelée des forêts charbonnées de plaine charentaises. Approche classique et détection semi-automatisée des plateformes de charbonnage. XXe colloque d'archéométrie du GMPCA.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, C., 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55, 1869–1887.
- Rouaud, R., 2013. Les forêts de pente de la haute vallée de la Dordogne : enjeux écologiques et énergétiques (PhD thesis). Université de Limoges.
- Royer, C., Cheval, F., Lassus, F. (dir.), 1988. Gamay noir et savagnin ou les Vignoble de Franche-Comté considérés sous le rapport de l'histoire, de la géographie et de l'ethnologie. France Régions, Belfort.
- Schweingruber, F.H., 1990a. Microscopic Wood Anatomy. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf.
- Schweingruber, F.H., 1990b. Anatomy of European woods. Paul Haupt Berne and Stuttgart Publishers.
- Syred, C., Griffiths, A.J., Syred, N., Beedie, D., James, D., 2006. A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP). *Fuel* 85, 1566–1578.
doi:10.1016/j.fuel.2005.10.026
- Trier, Ø.D., Pilø, L.H., Johansen, H.M., 2016. Semi-automatic mapping of cultural heritage from airborne laser scanning data. *Sémata: Ciências Sociais e Humanidades* 27.
doi:10.15304/s.0.2736
- Vernet, J., 1973. Etude sur l'histoire de la végétation du sud-est de la France au Quaternaire, d'après les charbons de bois principalement. Université des sciences et techniques, Laboratoire de paléobotanique, Montpellier.
- Viney, R., 1953. Forestier ou financier. *Revue Forestière Française* 9, 578–584.
- Vion-Delphin, F., 1991. L'approvisionnement en bois de chauffage d'une capitale provinciale au XVIIIe siècle: le cas de Besançon, in: *Le Bois et La Ville Du Moyen-Âge Au XXe Siècle*. Colloque de Saint-Cloud 18-19 Novembre 1988. pp. 51–74.
- Waterbolk, H., 1971. Working with Radiocarbon Dates. *Proceedings of the prehistoric society* 37, 15–33.
- Wehr, A., Lohr, U., 1998. Airborne laser scanning-an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 68–82.
- Wheeler, J., 2011. Charcoal analysis of industrial fuelwood from medieval and early modern iron-working sites in Bilsdale and Rievaulx, North Yorkshire, UK: evidence for species selection and woodland management. *Environmental Archaeology* 16, 16–35.
- Yates, A.B., Smith, A.M., Bertuch, F., 2015. Residue radiocarbon AMS dating review and preliminary sampling protocol suggestions. *Journal of Archaeological Science* 61, 223–234. doi:10.1016/j.jas.2015.06.011
- Zipper, A., Le Jean, Y., 1995. Stations forestières de Franche-Comté, catalogue des types de stations forestières des faisceaux de Besançon et Quingey. Office National des Forêts, Région Franche-Comté, Besançon.

Chapitre 4

De la caractérisation des bois charbonnés en forêt de Chailluz à la structure des peuplements présents aux époques moderne et contemporaine

Ce chapitre fait l'objet d'un article en préparation qui sera soumis dans le journal intitulé *Vegetation History and Archaeobotany*.

Auteurs : Dupin A., Girardclos O., Dufraisse A., Gauthier E.

Les données brutes seront prochainement disponibles sur <https://dataosu.obs-besancon.fr>

1. Introduction

De nombreuses études ont démontré que la forêt de Chailluz (forêt franc-comtoise) a été fortement exploitée à l'époque moderne jusqu'au XX^{ème} siècle à différentes fins. Parmi ces usages on retrouve le bois à usage domestique de l'armée française et des habitants du territoire bisontin, les échelas des vigneron, le bois d'architecture des bâtiments de Besançon, et également durant la Révolution industrielle, le bois pour l'industrie métallurgique (Arnould, 1978; Bru-Malgras, 2002; Dianin, 1995; Fohlen, 1982; Jacob and Mangin, 1990; Lacroix, 2006; Lassus, 1968; Morin, 1993; Ostermann, 2002; Vion-Delphin, 1991, 2002). Le recensement des différents produits qui en sont issus permet de faire l'hypothèse que l'exploitation de cette forêt gérée par les instances de la ville de Besançon est particulièrement partagée. Le charbonnage en forêt de Chailluz est attesté par la présence de près d'un millier de places à charbon datant des époques moderne et contemporaine (A partir du milieu du XVII^{ème} siècle : Fruchart, 2014). L'identification des taxons employés dans ces charbonnières à partir des restes de charbon révèle une forte coïncidence entre trois groupes de types de stations forestières actuels et les ressources utilisées à l'époque moderne, ce qui implique que les bois étaient peu déplacés pour être charbonnés et sont donc représentatifs des peuplements passés, d'autant plus qu'aucun choix taxonomique n'a été mis en évidence pour la fabrication du charbon de bois (Dupin et al., 2017).

L'analyse de la diversité des taxons reste toutefois insuffisante pour caractériser le bois utilisé pour la fabrication du charbon à Chailluz. Les gestionnaires de la forêt agissent plus directement sur la structure des peuplements, leur composition en étages de végétation, que sur leur composition en espèce (Bond et al., 2005; Bowman et al., 2011). Le calibre et les paramètres de croissance des bûches charbonnées sont alors nécessaires pour imaginer la structure des peuplements anciens exploités pour le charbonnage, et pour discuter de la place de cette pratique au sein des différents produits et usages de la forêt de Chailluz.

L'étude dendro-anthracologique des charbons des plateformes de Chailluz permet de caractériser les bûches charbonnées en estimant les proportions de leur calibre, et leurs paramètres de croissance, aboutissant à l'image de la structure forestière exploitée et du régime sylvicole adopté. Cette image est alors caractérisée par comparaison avec la signature de différents peuplements actuels de structures différentes (TSF jeune, TSF vieilli, futaie, haie, taillis). Cette comparaison permet donc d'estimer le type de peuplement présent au moment du charbonnage.

Enfin, la détermination des parties du bois (organe de l'arbre) d'où sont issues les bûches charbonnées, et les paramètres dendro-anthracologiques permettent d'estimer le mode de collecte adopté pour la fabrication du charbon, en comparant ces données avec celles caractérisant des bois actuels de référence de branches, de brins de cépée et de francs-pieds.

2. Matériels et méthodes

2.1 Peuplements actuels référentiels

2.1.1 Paramètres dendrométriques référentiels

2.1.1.1 Objets d'étude

Deux inventaires dendrométriques de la végétation ligneuse en place ont été réalisés au voisinage des plateformes de charbonnages CH29 et CH30 de la forêt de Chailluz (I1 et I2 sur la **figure 4.1**). A cet endroit, la sylviculture du XX^{ème} siècle, suivant les règles générales de conversion, a fait évoluer le peuplement en TSF vers une futaie, c'est pourquoi 4 autres inventaires ont été conduits à des endroits plus éloignés de plateformes. Ils ont été choisis de façon à recouvrir une part la plus représentative possible de la diversité des structures de peuplement de la forêt de Chailluz, et de façon à estimer leur adaptation au charbonnage. La documentation propose un diamètre charbonnable compris entre 5 et 10 cm (**Duhamel de Monceau, 1774; Malepeyre, 1836**). L'inventaire dendrométrique concerne toutes les tiges de plus d'un mètre de haut, quel que soit leur diamètre, et permet d'estimer le volume fourni dans des classes considérées « charbonnables ». Ces inventaires ont ainsi été réalisés dans les parcelles 169 et 173 qui font partie d'une série de parcelles dans lesquelles la conversion n'a pas été mise en œuvre. Les documents d'aménagements conservent l'objectif d'un peuplement en taillis-sous-futaie jusqu'en 2002 (**communication ONF, Grosbois J.-P., Sthal R., Mous B.**). La structure de la parcelle 173 présente les caractéristiques d'un TSF pauvre en réserve à taillis vieillis (inventaires 3 et 4) et celle de la parcelle 169 d'un TSF localement dégradé présentant une forte proportion de taxons pionniers (inventaires 5 et 6).

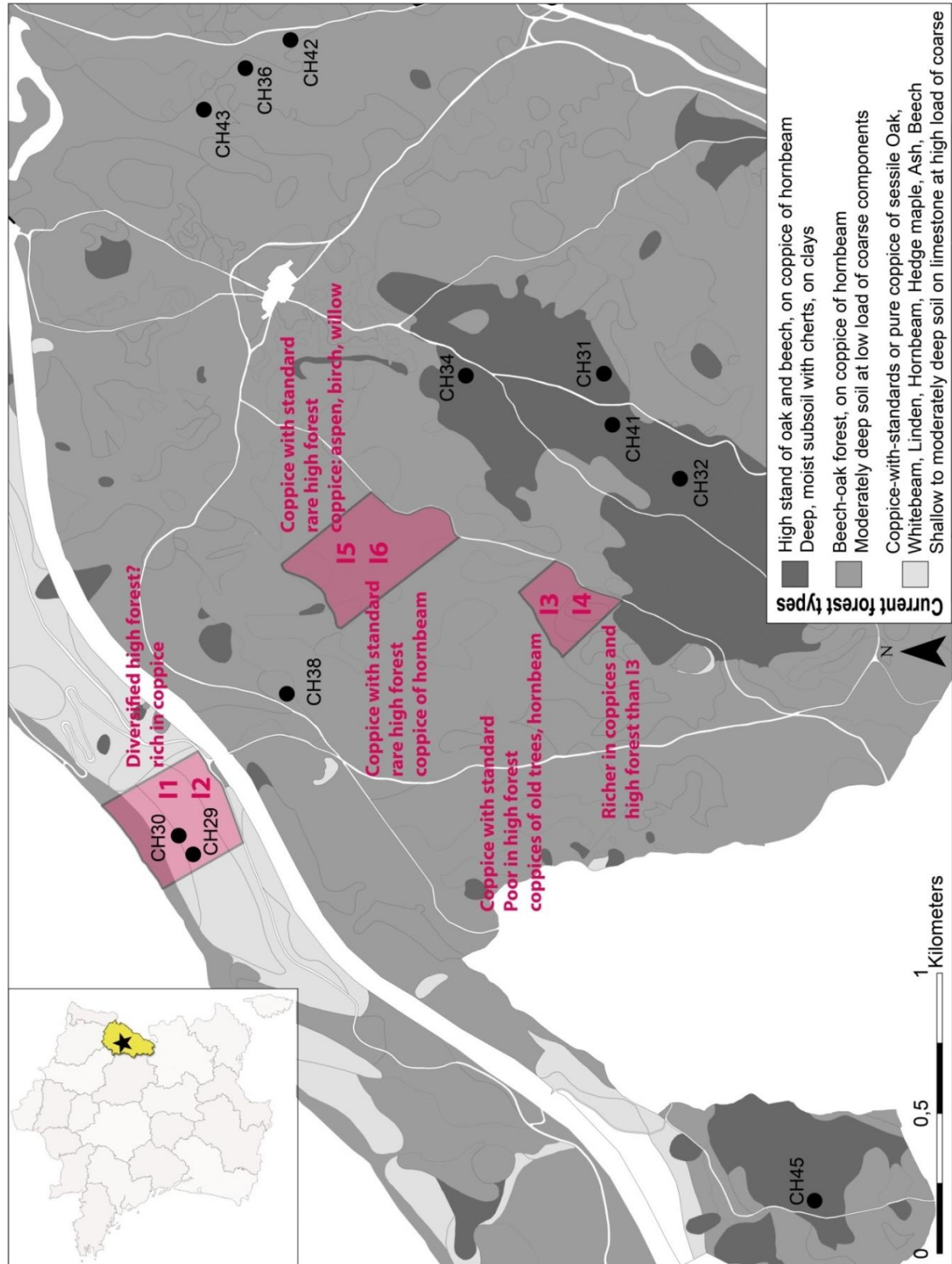


Figure 4.1 : Carte de la forêt de Chailluz représentée par groupe de types de stations forestières actuelles (donnée : Office National des Forêts). Les plateformes de charbonnage qui ont été analysées par anthraco-analyse sont représentées (Dupin et al., 2017), ainsi que la localisation des inventaires botaniques réalisés pour la présente étude.

2.1.1.2 Méthodes de mesure et modèle de décomposition des volumes de bois

Dans le but de caractériser la signature diamétrale de ces trois types de peuplements, chaque tige présente sur les placettes des inventaires a été répertoriée par taxon. Le diamètre a été mesuré à un mètre du sol et la hauteur a été estimée en attribuant trois classes de dominance : 2 m de haut pour les arbustives basses, 8 m pour les arbustives hautes et 9 m pour les arbres dominants, en excluant le houppier. Les résultats sont exprimés en surface terrière, puis le volume de chaque tige est estimé en multipliant la surface par la hauteur. Ce volume cylindrique surestime le volume réellement disponible, mais permet d'intégrer l'information liée à la stratification.

En raison du processus de carbonisation, la signature diamétrale d'une bûche mise au feu est différente de celle du corpus de charbons de bois obtenu. En effet, durant ce processus trois facteurs vont distordre la signature diamétrale initiale : la fragmentation, la perte au feu des petits calibres et des parties externes des gros calibres, et le retrait du bois. [Alexa Dufraisse \(2002a\)](#) a donc mis au point un modèle prédictif intégrant le facteur « fragmentation ». Le principe utilisé pour ce modèle est qu'une bûche de bois est composée d'une succession de cylindres de calibres différents, dont le plus fort diamètre de cylindre est celui de la bûche de bois (**figure 4.2, A**). La table de calcul du modèle a ainsi été fondée sur l'hypothèse que tous les cylindres composant une bûche de bois se retrouvent dans le corpus anthracologique (**figure 4.2, B**). Le modèle permet alors d'estimer les proportions de chaque calibre des cylindres composant les bûches carbonisées, à partir des proportions des bûches mises au feu, par classe de diamètre (principe de décomposition : en vert sur la **figure 4.2, B**). Il permet également d'utiliser le principe inverse, en estimant les proportions des calibres des bûches mises au feu, à partir des volumes des cylindres de bûches carbonisées par classe de diamètre (principe de recombinaison : en rouge sur la **figure 4.2, B**).

Appliqué aux six référentiels présents, ce modèle permet donc par principe de décomposition des proportions des calibres des arbres sur pied, d'estimer les proportions des diamètres des cylindres composant les bûches carbonisées qui seraient issues de la carbonisation de l'ensemble des arbres répertoriés dans chaque inventaire.

Par ailleurs, bien que tenant compte du facteur « fragmentation », ce modèle ne tient pas compte du facteur « perte au feu », puisque qu'il est basé sur l'hypothèse que toutes les parties de la bûche à carboniser sont représentées dans le corpus anthracologique final. Les proportions des cylindres de bûches carbonisées de petit diamètre (<10 cm) sortant du modèle sont donc surestimées, de même que les proportions des plus gros calibres. Nous garderons cette information en tête pour l'interprétation des résultats. De plus, le retrait radial du bois ayant une variabilité relativement forte entre 8 et 25% selon le taxon, ([Dufraisse, 2006](#); [McGuinness et al., 1971](#); [Schlöpfer, 1948](#); [Schweingruber, 1978](#)), la température atteinte lors de la carbonisation ([Dufraisse and Garcia Martinez, 2011](#); [Garcia Martinez and Dufraisse, 2012](#)) ([Braadbaart and Poole, 2008](#); [Davidsson and Pettersson, 2002](#)), ou encore la localisation dans le cerne ([Cutter et al., 1980](#)), ce facteur de distorsion n'est pas lissé lors du passage par le modèle prédictif. Nous avons donc retiré 16 % aux diamètres mesurés des bois sur pied, dans chaque inventaire.

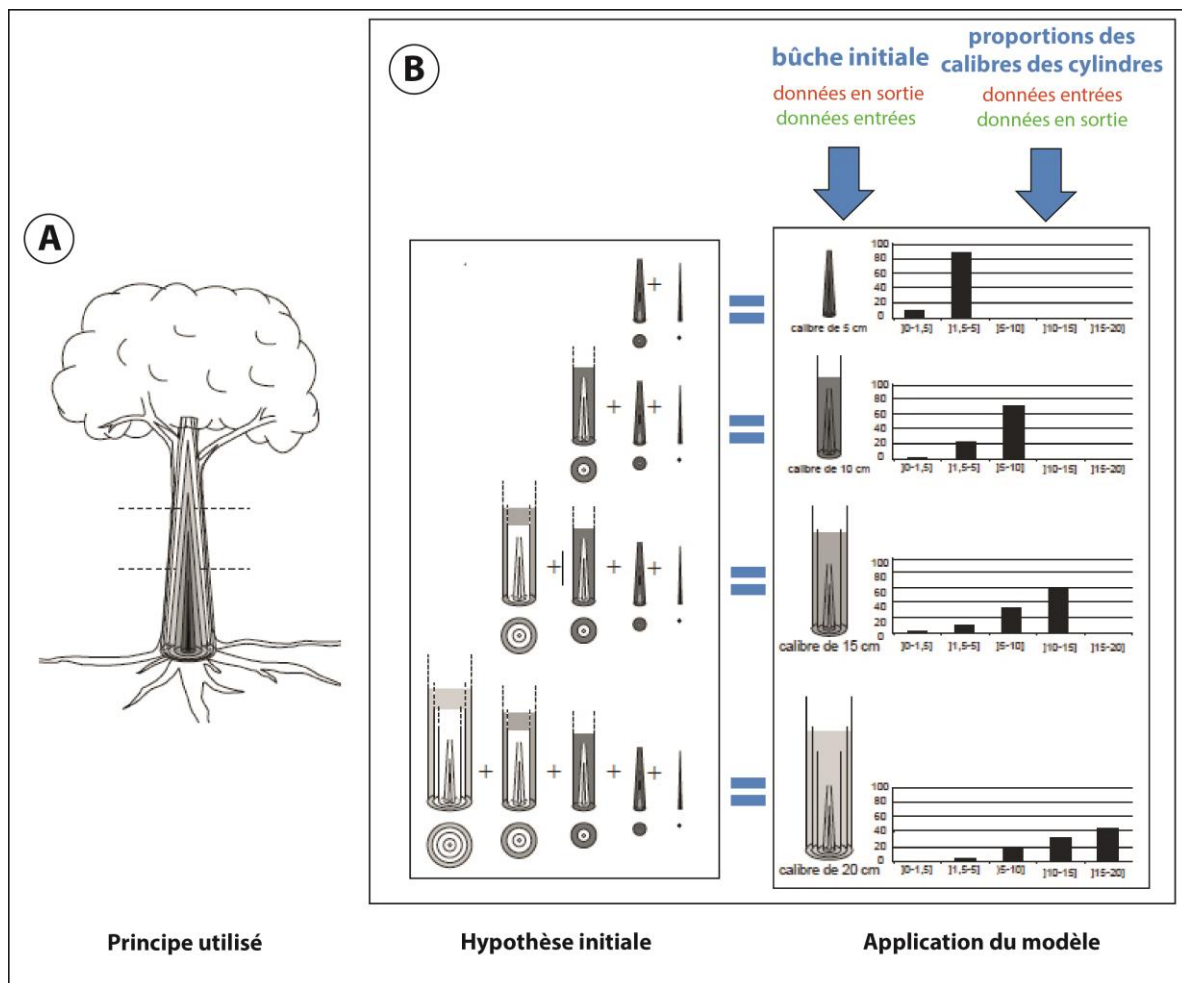


Figure 4.2 : Représentation schématique du modèle prédictif (Dufraisse 2002, modifié).
A : Principe utilisé : Une bûche de bois est composée d'un emboîtement de cylindres de calibres différents.
B : Hypothèse de départ (à gauche) : Chaque cylindre de la bûche fragmentée se retrouve dans le corpus anthracologique.
Application du modèle (à droite) : En rouge, le modèle prédictif de recomposition. En vert, le modèle prédictif de décomposition.

2.1.2 Conditions de croissance référentielles

Les référentiels de charme et de hêtre sont des charbonnettes issues d'un lot commercial acheté en bordure d'un bois privé à côté de la forêt de Chailluz, présentant une situation analogue à l'inventaire I6. Les diamètres de bois de plus de 20 cm ne sont donc pas représentés dans ce lot. Ces bois référentiels sont au nombre de 11 pour le charme et 13 pour le hêtre. Nous les nommerons respectivement « *carpinus* » et « *fagus* » pour la suite de ce chapitre.

Concernant le chêne, six lots présentant des propriétés différentes ont pu être référencés. Le premier lot est issu de coupes d'affouage prélevé dans le houppier de chênes gérés en futaie à Braillans, Pouligney et à Marchaux (communes situées dans un rayon de 15 km au Nord-Est de Besançon). 20 branches ont ainsi été prises pour référence pour la présente étude. Nous les nommerons « branches ». Le second lot de 11 tiges référence trois taillis de chêne situés à Chantrans (commune située à 30 km au sud de Besançon), présentant des facteurs

d'élanement différents (rapport hauteur de la tige/diamètre à 1 m de haut). Le taillis-I possède le plus petit facteur d'élanement, il est donc le moins compétitif des trois taillis. Le taillis-III est le plus compétitif, tandis que le taillis-II est intermédiaire entre les deux premiers. Le troisième lot est composé de 11 bois issus d'éclaircis d'une jeune futaie située dans la forêt communale de Braillans. Nous le nommerons « éclairci » dans la suite du chapitre.

Les trois derniers lots sont en réalité des moyennes de largeurs de cerne par classe de diamètre. La première d'entre elle résulte de l'étude de peuplements francs-comtois gérés en TSF, mais en conversion vers une futaie (base de données dendrochronologiques, laboratoire chrono-environnement). Nous la nommerons « TSF » dans la suite du chapitre. La deuxième moyenne résume les paramètres de croissance d'un peuplement de haies présentes sur la commune d'Oussières (Jura, 39) (base de données dendrochronologiques, laboratoire chrono-environnement). Nous la nommerons « haie ». Et la dernière moyenne représentant le bois de futaie, résulte de l'analyse dendrochronologique de deux forêts de chêne du Nord-Est de la France, comprenant 150 placettes, et dont les auteurs ont défini une équation reliant la largeur de cerne et le diamètre, utilisée pour la présente étude (Becker et al., 1994). Nous nommerons ce lot, « futaie ».

Pour l'ensemble des trois premiers lots, les mesures de largeurs de cerne ont été réalisées par l'utilisation de la table de mesure TSAPWin Rinntech, sur au moins 2 chemins de mesure (de la moelle à la limite cambiale) par section de bois prélevée dans les tiges. De une à trois sections ont été prélevées par tige référentielle, et le diamètre de chaque section de bois a été obtenu en additionnant les largeurs de cerne d'un même chemin de mesure.

2.2 Les charbons archéologiques

Les charbons de bois étudiés ici sont ceux dont le taxon a été identifié dans une étude antérieure (Dupin et al., 2017). Ces charbons proviennent de 11 plateformes localisées en forêt de Chailluz (figure 4.1).

2.2.1 Calibres des bois charbonnés

2.2.1.1 Diamètres des charbons de bois : l'outil trigonométrique

Dans le but de caractériser la signature diamétrale des charbons de bois des plateformes de Chailluz, les calibres des cylindres issus de bûches carbonisées d'où sont issus les charbons de bois ont été mesurés. Pour ces mesures, l'outil trigonométrique développé par Dufraisse and Garcia Martinez (2011) a été utilisé sur les charbons. Cet outil consiste à mesurer l'angle α entre deux rayons ligneux observés en face transversale du charbon, ainsi que la distance D entre ces deux rayons au cerne le plus récent, donc le plus externe (figure 4.3). Ces mesures permettent, à l'aide de la formule trigonométrique d'un triangle rectangle (hypoténuse = côté opposé / $\sin \alpha$), d'estimer la distance manquante entre la moelle et le cerne mesuré, représentée sur la figure par le rayon ligneux 1. En multipliant cette distance par 2, l'outil permet d'obtenir le diamètre du cylindre de bois carbonisé dont le charbon de bois est issu. Dans le cadre de la présente étude, les mesures ont été réalisées par l'utilisation d'un microscope optique à réflexion équipé d'un micromètre et relié à un ordinateur doté du logiciel Nis-element. Chaque mesure a été répétée sur 5 couples de rayons différents sur le même charbon, puis les résultats de chaque charbon ont été moyennés en retirant les deux valeurs extrêmes. Pour obtenir des résultats significatifs, l'outil trigonométrique est utilisable pour des angles $\alpha > 2^\circ$ et des distances $D > 2\text{mm}$. Par ailleurs, Garcia Martinez and Dufraisse

(2012) ont démontré que les mesures des diamètres estimés avec l’outil trigonométrique sont sous-estimées pour les calibres supérieurs à 10 cm. Les auteurs proposent un facteur de correction différent selon le diamètre obtenu, à appliquer sur les résultats. Toutefois, ce facteur de correction a été déterminé seulement jusqu’à 20 cm de diamètre, sur des charbons de pins. Nous avons donc pris le parti de ne pas l’appliquer sur les charbons des plateformes de la forêt de Chailluz, mais de garder en tête que les diamètres mesurés seront sous-estimés d’une vingtaine de pourcents pour les calibres de plus de 10 cm.

De plus, trois paramètres anatomiques (cambium, moelle, écorce) permettant de localiser le charbon de bois au sein de la bûche carbonisée, ont également été enregistrés pour chaque charbon s’ils étaient présents.

Par facilité de lecture, le raccourci « diamètre du charbon de bois » sera utilisé tout au long du chapitre pour parler du diamètre du cylindre issu de la bûche carbonisée d’où est issu le charbon de bois.

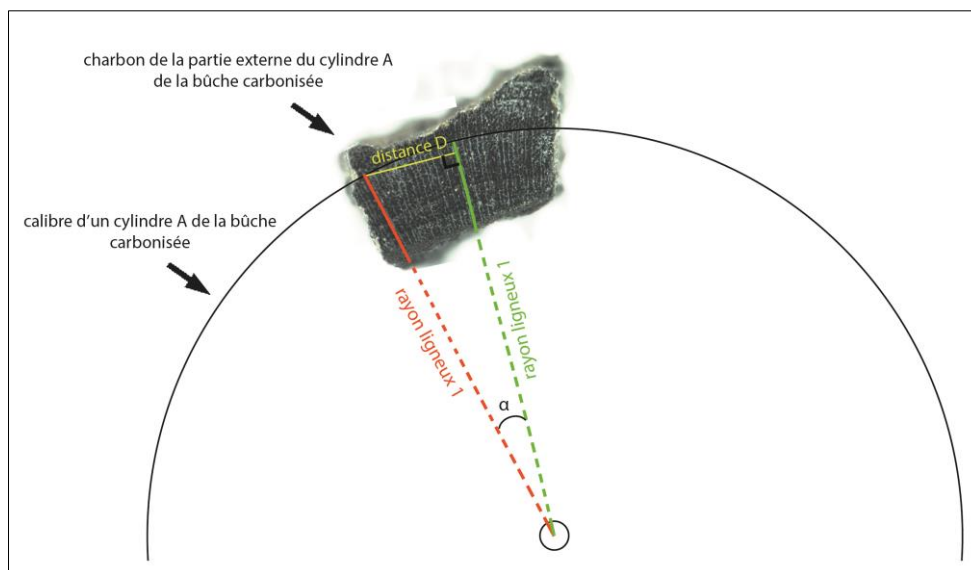


Figure 4.3 : Représentation schématique de la mesure du diamètre d'un cylindre de bois carbonisé A, par l'utilisation de l'outil trigonométrique développé par Dufraisse and Garcia Martinez, 2011.

2.2.1.2 Proportions des calibres des bûches charbonnées : le modèle prédictif de recomposition

Dans le but d’estimer les proportions des calibres des bûches charbonnées par plateformes de charbonnage, les diamètres des charbons de bois estimés par l’outil trigonométrique ont été utilisés comme entrées dans le modèle prédictif de recomposition développé par Dufraisse (2002) (figure 4.2, B rouge).

Les volumes de chaque charbon, nécessaires pour l’entrée des données dans le modèle, ont été calculés de la manière suivante : $\text{Volume}_{\text{fragment}} = \text{masse}_{\text{fragment}} / \rho_{\text{charbon de bois}}$. Les fragments de charbon ont été pesés individuellement, toutefois la masse volumique du charbon de bois dépend de différents facteurs tels que le taxon et le degré de siccité (Hardy and Dufey, 2012). Elle dépend donc des conditions de site et de la pratique de pyrolyse. C’est pourquoi nous avons calculé la masse volumique des charbons de bois des plateformes de Chailluz à partir des deux taxons les plus représentés sur le site, à savoir le charme et le chêne. Les volumes de 50 charbons référentiels (20 de charme et 30 de chêne) ont ainsi été

mesurés au pied à coulisse, en moyennant 4 répétitions par fragments. Les résultats fournissent une masse volumique des charbons de chêne de 482.1kg/m^3 et celle des charbons de charme de 483.8kg/m^3 ($\rho_{\text{charbon de bois}} = \text{masse}_{\text{fragment}} / \text{Volume}_{\text{fragment}}$). Ces masses volumiques n'étant pas significativement différentes (Wilcoxon test, p-value=0.39) et donc pouvant être apparentée à une constante, les masses des charbons de bois ont été utilisées dans le modèle prédictif de recomposition, au détriment des volumes.

Le modèle prédictif de recomposition ne prenant pas en compte le facteur de distorsion de la signature diamétrale « retrait du bois », 16% ont été ajoutés aux données entrées dans le modèle (paragraphe 2.1.1.2). Par ailleurs, nous garderons en tête que les résultats fournis par le modèle seront sous-estimés pour les calibres >10 cm, puisque le facteur « perte au feu » n'est également pas pris en compte par le modèle.

2.2.2 Conditions de croissance du bois charbonné

Dans le but de caractériser les conditions de croissance des trois groupes de types de stations forestières au moment du charbonnage, les largeurs de cerne des charbons archéologiques ont été mesurées via l'utilisation du logiciel Nis-element. Ainsi, chaque largeur de cerne a une correspondance en diamètre.

Le potentiel génétique régissant la biologie interne de l'arbre et les facteurs environnementaux biotiques et abiotiques, influent sur la largeur des cernes au moment de leur formation (Munaut, 1988). Par ailleurs, la présente étude étant très localisée (à l'échelle de la forêt), les facteurs abiotiques tels que le climat ou les facteurs édaphiques ont eu une influence homogène sur la formation des cernes des bûches charbonnées. De même, les trois groupes de types de stations présentant chacun un grand nombre de charbons analysés, les résultats de largeur de cerne sont représentatifs du peuplement forestier présent au moment du charbonnage, et les variabilités de LC à l'échelle individuelle sont lissées (Marguerie, 1991). La mesure des largeurs de cerne des charbons de bois à l'échelle du groupe de types de stations, permet alors de caractériser les conditions environnementales biotiques telles que la concurrence et l'activité sylvicole de chaque groupe, autorisant ainsi la comparaison avec les conditions de croissance référentielles définies dans ce chapitre.

2.2.3 Détermination des parties de tiges de chêne utilisées pour le charbonnage

Une étude a permis de définir les parties de la tige d'où sont issus les charbons de chêne : tige mature ou jeune tige et zone interne, moyenne ou externe de tige mature, réparties en 8 anthraco-groupes selon les conditions de croissance des tiges (Dufraisse et al., 2017b). Cette classification est basée sur la combinaison de 3 paramètres mesurables sur chaque fragment de charbon : la localisation au sein de la section de bois (aubier ou duramen), la largeur de cerne moyenne du fragment et le diamètre mesuré du charbon. Chaque fragment est alors attribué à un anthraco-groupe dont les proportions par groupe de types de stations forestières permettent d'estimer les proportions des parties de tiges de chêne utilisées pour la fabrication du charbon de bois.

Dans le cas d'étude présent, l'analyse s'est portée sur l'ensemble des charbons de chêne identifiés au sein des 11 plateformes de charbonnage. Les largeurs de cerne ont été mesurées au microscope optique à réflexion (paragraphe 2.2.2) et les diamètres ont été mesurés grâce à l'outil trigonométrique (paragraphe 2.2.1.1).

2.2.3.1 Identification aubier/duramen

Pour situer les charbons de chêne au sein d'une section de bois (proche de la moelle ou de l'écorce), nous avons défini, quand cela était possible, l'appartenance des fragments analysés au bois de cœur (duramen) ou au bois d'aubier. En effet, l'aubier étant la partie vivante du bois où circule la sève depuis les racines (Haneca et al., 2009), il est situé sous la zone cambiale, donc proche de l'écorce. Le bois de cœur est quant à lui, la partie centrale du bois où la sève ne circule plus. Il a essentiellement un rôle de soutien (Hillis, 1987). Cette dernière partie est formée avec l'âge par des processus physiologiques, à partir de 20-25 ans chez le chêne (Dhôte et al., 1997; Lambert, 1996).

Toutefois, l'identification aubier/duramen n'est pas toujours possible selon les taxons, en particulier une fois le bois carbonisé puisque ces deux parties se différencient essentiellement par leur couleur. En revanche, il a été remarqué que durant la duraminisation, les vaisseaux du bois de cœur sont obstrués par des thylles (Hillis, 1987; Tyree and Zimmermann, 2002). Ces thylles sont nombreux dans le duramen de *Quercus sp.* (Hillis, 1987), et peuvent également être produits dans l'aubier lors de traumatisme suite à une blessure, une attaque fongique ou encore une embolie hivernale (Cochard et al., 1992; Fromm et al., 2001; Granier et al., 1994). Plus précisément, Dufraisse et al. (2017a) ont démontré que l'aubier, chez le chêne, comprend moins de 65% de vaisseaux obstrués par des thylles et le duramen est caractérisé par plus de 85% de vaisseaux obstrués. Ces thylles sont conservés et identifiables sur les charbons de bois, pour des températures de pyrolyse allant jusqu'à 800°C (Kim and Hanna, 2006).

Le pourcentage de thylles par charbon de chêne a donc été estimé en comptant le nombre de vaisseaux obstrués par groupe de 15 vaisseaux. La mesure a été répétée trois fois sur le même fragment. Lorsque le pourcentage de vaisseaux obstrués par des thylles était compris entre 65 et 85%, nous avons défini le charbon analysé comme « indéterminé ».

2.2.3.2 Détermination des anthraco-groupes

Un faible diamètre mesuré (<7 cm) et l'identification d'aubier, tendent à démontrer que le charbon est issu d'une jeune tige. Plus précisément, si les cernes sont minces (<0.7 mm), donc associés à des conditions de croissance peu favorable (Davasse, 1989), alors il s'agit de l'anthraco-groupe 1. De plus, si les largeurs de cerne tendent à diminuer avec le diamètre, alors il s'agit de branches. L'anthraco-groupe 2 se caractérise par des cernes larges (>0.7 mm), donc par des conditions de croissance favorables. Et si les largeurs de cerne tendent à augmenter avec le diamètre, alors il s'agit de tronc (taillis ou pied franc) (Dufraisse et al., 2017a). Un charbon à faible diamètre en duramen est apparenté à une zone interne d'une tige mature. Ce charbon fait alors partie de l'anthraco-groupe 3 si les cernes sont minces et il fait partie de l'anthraco-groupe 4 si les cernes sont larges. Un charbon d'aubier à fort diamètre (>7cm) est issu d'une zone externe d'une tige mature. Il est alors classé dans l'anthraco-groupe 5 si les cernes sont minces et dans l'anthraco-groupe 6 s'ils sont larges. Enfin, un charbon de duramen à fort diamètre est issu d'une zone moyenne d'une tige mature. Il est classé dans l'anthraco-groupe 7 si les cernes sont minces et dans l'anthraco-groupe 8 s'ils sont larges.

3. Résultats

3.1 Peuplements actuels référentiels

3.1.1 Paramètres dendrométriques référentiels

Dans un premier temps, il est à constater que des tiges sur pied de 2 cm de diamètre et moins ainsi qu'inférieures à 7 cm sont mesurées dans tous les inventaires dendrométriques (**figure 4.4**). Des tiges dont la littérature permet de faire l'hypothèse qu'elles sont utilisées pour le charbonnage sont donc rencontrées dans toutes les structures de peuplement analysées. En revanche, on peut constater que le nombre de petites tiges à l'hectare dans les TSF est nettement plus grand (jusqu'à 9 fois plus pour les TSF dégradés) (**figure 4.5**). Compte tenu des volumes de tige de moins de 7 cm par inventaire, il faudrait prospecter 10.3 ha dans une placette ayant la même structure de peuplement que l'inventaire 1 pour obtenir suffisamment de bois pour alimenter une meule de charbon de 100 stères (**communication personnelle, Baraques du 14**). Dans le même but, il faudrait prospecter 10.2, 2.2, 3, 1.2 et 0.8 ha dans des placettes semblables respectivement aux inventaires 2, 3, 4, 5 et 6.

Ces bois de diamètre inférieur à 7 cm, potentiellement utilisés pour le charbonnage, sont essentiellement composés dans les TSF de charme, suivi des taxons sciaphiles et héliophiles (ex. aubépine, houx, noisetier). Par ailleurs, le chêne est fortement présent dans les futaies et les TSF à taillis vieillis pour des diamètres supérieurs à 7 cm, alors qu'il est totalement absent dans les TSF dégradé et dans l'ensemble des inventaires pour des diamètres charbonnables.

Les distributions des volumes sont très différentes de celles des diamètres mesurés car les arbres de gros diamètres représentent la très grande majorité du volume total (comparaison des figures 4.4 et 4.5).

La forme des distributions des volumes de bois par diamètres permet toutefois d'individualiser les structures de peuplement (**figure 4.4**). Pour les futaies (I1 et I2) les modes sont à]20-40] cm, pour les TSF vieillis à]40-60] cm et pour les TSF dégradés à]4-7] cm pour l'inventaire 6 et à]20-40] cm pour I5. Concernant les distributions des diamètres attendus après fragmentation (**en noir sur la figure 4.4**), ce sont les valeurs maximales qui permettent d'identifier les différentes structures de peuplement. Les bois les plus gros :]80-100] cm, sont observés dans les futaies (inventaire 1). Pour les TSF vieillis il est à]40-60] cm, et pour les TSF dégradés, il est à]20-40] cm]. L'inventaire 6 qui est un TSF dégradé, s'individualise d'autant plus par l'observation du mode des diamètres attendus après fragmentation. Il est à]4-7] cm, alors qu'il est à]10-40] pour les autres inventaires. Enfin, les distributions observées tendent vers une apparence gaussienne, à l'exception des deux TSF I4 et I5, qui présentent une distribution plutôt exponentielle.

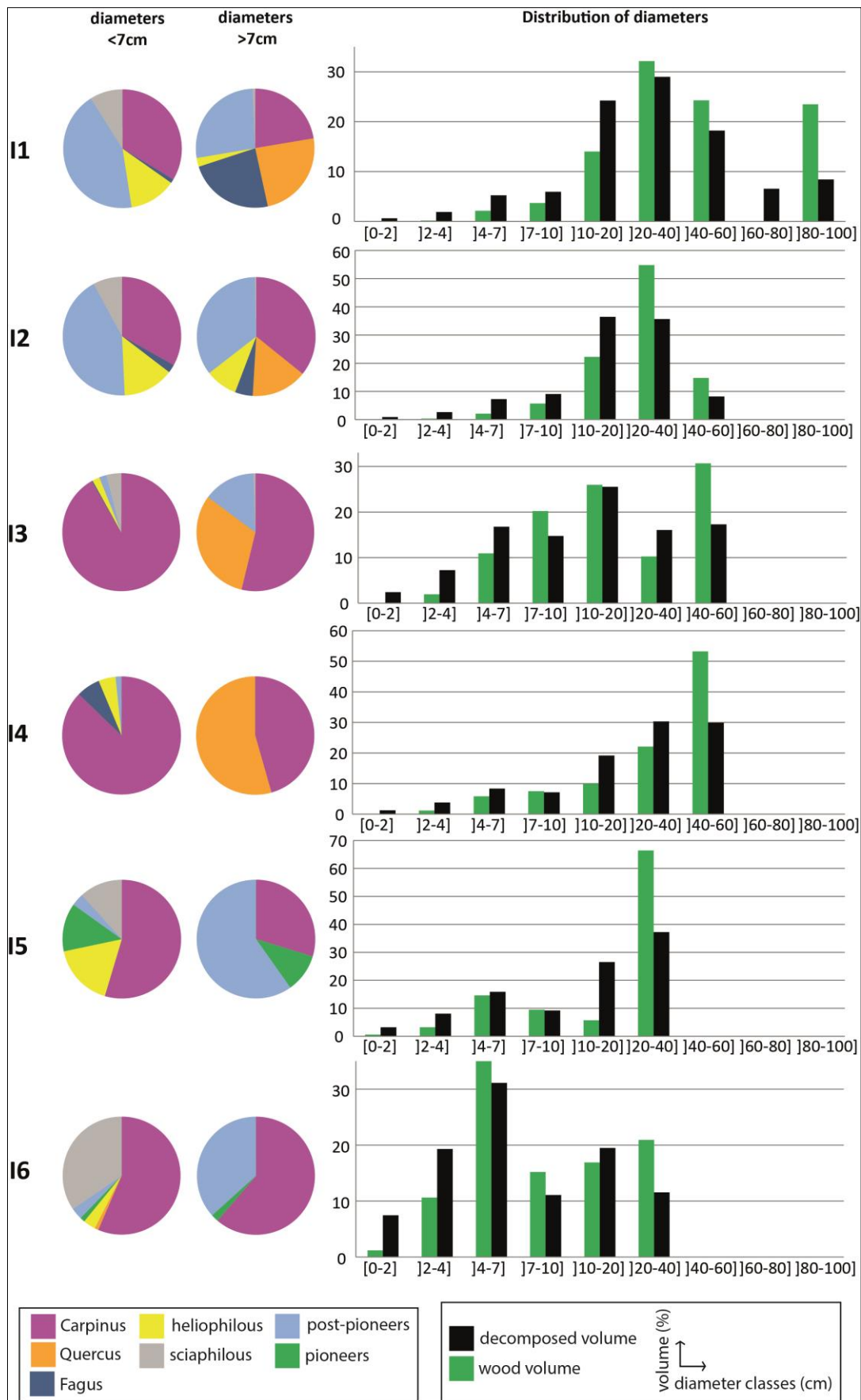


Figure 4.4 : Utilisation du modèle prédictif sur les bois sur pied des inventaires dendrométriques. Les volumes de bois sont représentés en vert, et les volumes décomposés sont en noir.

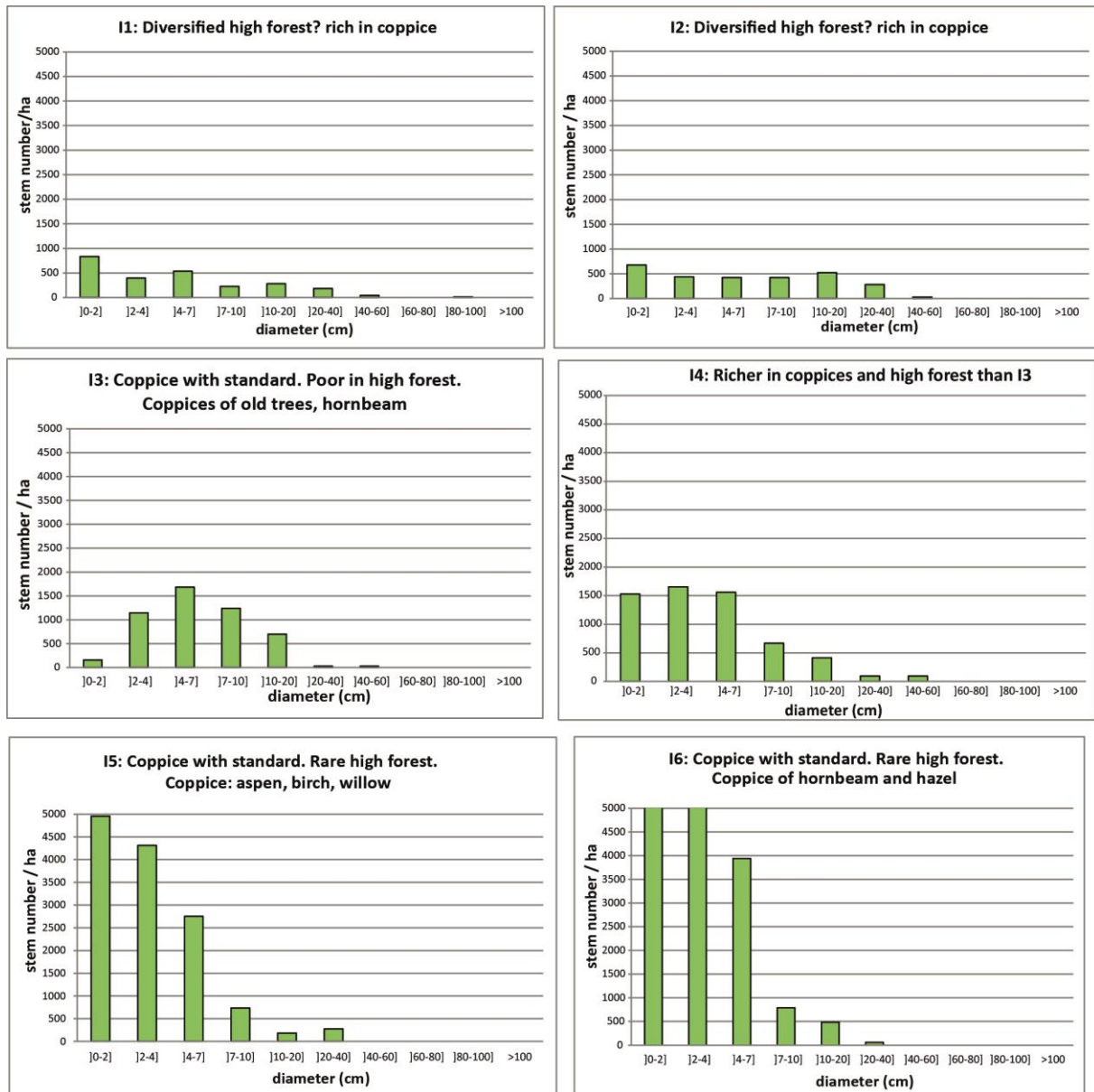


Figure 4.5 : Nombre de tige par hectare en fonction des classes de diamètres, par inventaire dendrométrique.

3.1.2 Conditions de croissance référentielles

Les valeurs minimales de diamètres mesurés des tiges permettent de distinguer les trois taillis du reste des données. Effectivement, les tiges analysées dans les taillis ont des diamètres à partir de 6.8 cm, tandis que dans les autres groupes des tiges de plus petits diamètres sont disponibles (3.8 cm de diamètre dans l'éclairci) (**figure 4.6**). Par ailleurs, les branches se distinguent clairement des autres groupes par la dispersion des données, qui est bien plus forte (25 cm d'amplitude). La dispersion des diamètres des éclaircis est également assez forte, autour de 18 cm d'amplitude, tandis que celles des autres groupes ne dépassent pas 13 cm. L'ensemble regroupant le bois de chauffage correspond à des bois de faible diamètre maximum, ne dépassant pas 9 cm (7.6 cm pour le charme et 9 cm pour le hêtre), tandis que les branches de futaie, les éclaircis et les taillis de chêne ont, quant à eux, des diamètres maximum avoisinant la vingtaine de centimètre. Les bois de chauffage s'individualisent également par leur diamètre moyen entre 4.7 et 5 cm, tandis que ceux du reste des groupes sont supérieurs au diamètre charbonnable (<7cm), et difficilement remarquables les uns des autres, allant de 9.1 à 15.4 cm.

De manière générale, pour l'ensemble des largeurs de cerne (LC) mesurées, la moyenne des données par groupe est large (supérieure à 0.7 mm), allant de 0.9 à 2.9 mm (**figure 4.7**). Les largeurs de cerne minimales, s'échelonnant entre 0.03 et 0.2 mm, ne permettent pas de les discerner les groupes uns des autres. Toutefois, les éclaircis et les branches se différencient des bois de chauffage et des taillis par leur plus forte dispersion des données (de 0.1 à 8.4 mm contre 0.1 à 5.9 mm pour le taillis-I), ainsi que par la haute moyenne des largeurs de cerne des éclaircis (2.9 mm contre 1.5 mm pour le taillis-I et 1.1 mm pour les branches). Enfin, le taillis-I diffère du groupe *carpinus/fagus/taillis-II* et III par une plus haute largeur de cerne maximale (5.9 contre 4-4.5 mm). Cette différence est en adéquation avec la pression environnementale sur les trois taillis puisque le taillis-I est moins compétitif que les deux autres.

En allant plus loin, les tendances observées dans les relations des largeurs de cerne avec le diamètre de la tige permettent une meilleure caractérisation des différents groupes. Pour certains modes de gestion forestière, les largeurs de cerne moyennes diminuent avec le diamètre, tel que pour les trois types de taillis, le TSF et la futaie (**figure 4.8**). Inversement, entre 0 et 2 cm de diamètre, les bois de chauffage en hêtre et de l'éclairci ont des largeurs de cerne qui tendent à augmenter avec le diamètre, alors qu'au-delà de 2 cm elles diminuent. Le bois de chauffage de charme, les branches de futaie et les haies ont une tendance maintenue, de pente nulle ou très faible, des largeurs de cerne avec le diamètre.

Au regard des moyennes de largeurs de cerne (MLC) par classe de diamètre, cinq groupes peuvent être distingués. Les trois types de taillis et la futaie présentent effectivement une diminution de la MLC avec le diamètre (**figure 4.9**). Plus précisément, du taillis I au taillis III, les MLC sont plus basses quelle que soit la classe de diamètre observée. Pour la classe de diamètre]0-2] cm par exemple, la MLC du taillis I est de 2.8 mm, contre 1.9 pour le taillis III. La futaie se distingue du taillis I par des MLC plus basses sur les premiers centimètres de diamètre. Le TSF est caractérisé par une diminution des MLC avec le diamètre comme le groupe précédent, mais la pente est plus faible et le niveau plus élevé. Une légère augmentation de la MLC, sur la classe de diamètre]10-20] cm, semble être un biais de représentativité dans les données. Le troisième groupe composé des bois de chauffage de charme et de hêtre se caractérise par une légère diminution des MLC sur les premiers centimètres puis d'une augmentation franche à partir de 7 cm qui semble aussi liée au faible nombre de données. De plus, le niveau des MLC est particulièrement bas sur l'ensemble des

classes de diamètres (à l'exception de la classe]7-10]), ne dépassant jamais les 1 mm. Pour les branches et les haies, les MLC augmentent légèrement sur les quatre premiers centimètres puis diminuent mais à des niveaux très différents. Enfin, pour les bois de l'éclairci la MLC augmente sur les 4 premiers centimètres puis diminue de 4 à 10 cm. Au-delà de 10 cm une augmentation est observée mais le nombre de données est faible.

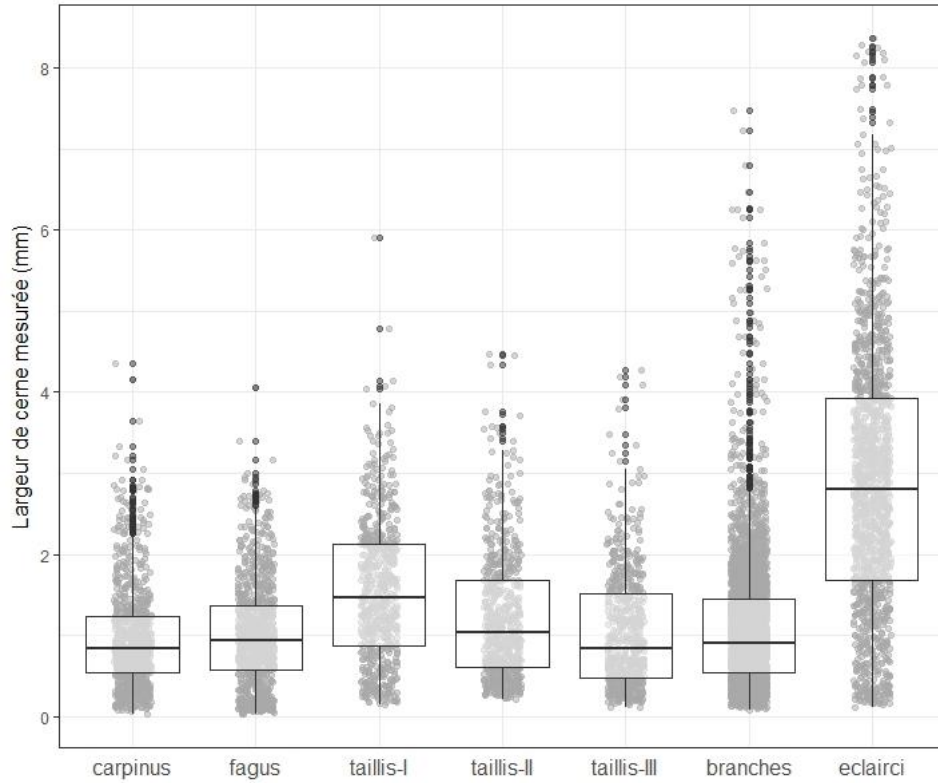


Figure 4.6 : Largeurs de cerne mesurées exprimées par référentiel.

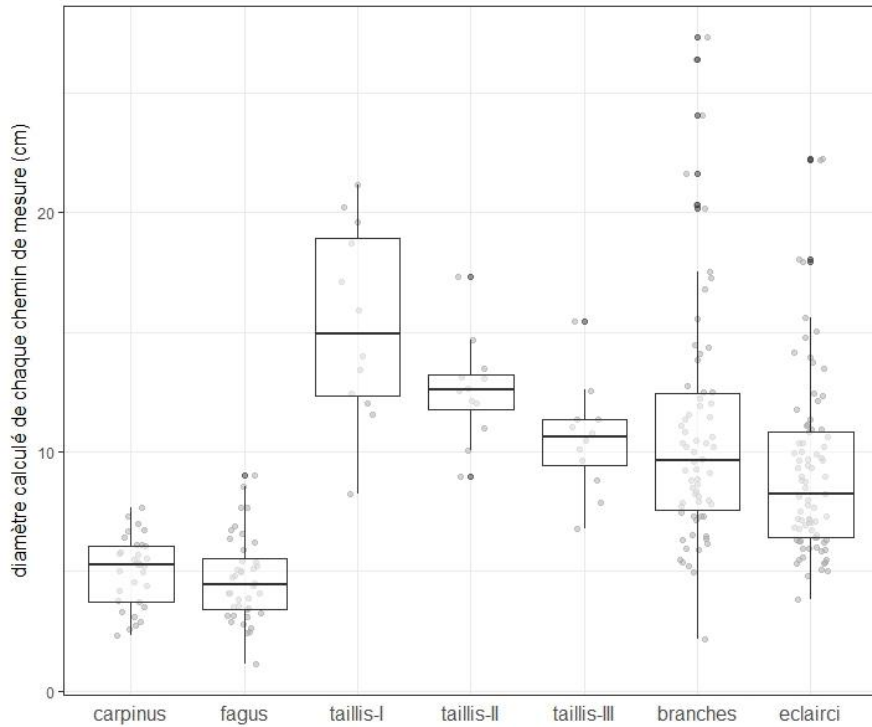


Figure 4.7 : Diamètres calculés à partir de la somme des largeurs de cerne mesurés pour chaque chemin de mesure, exprimés par référentiel.

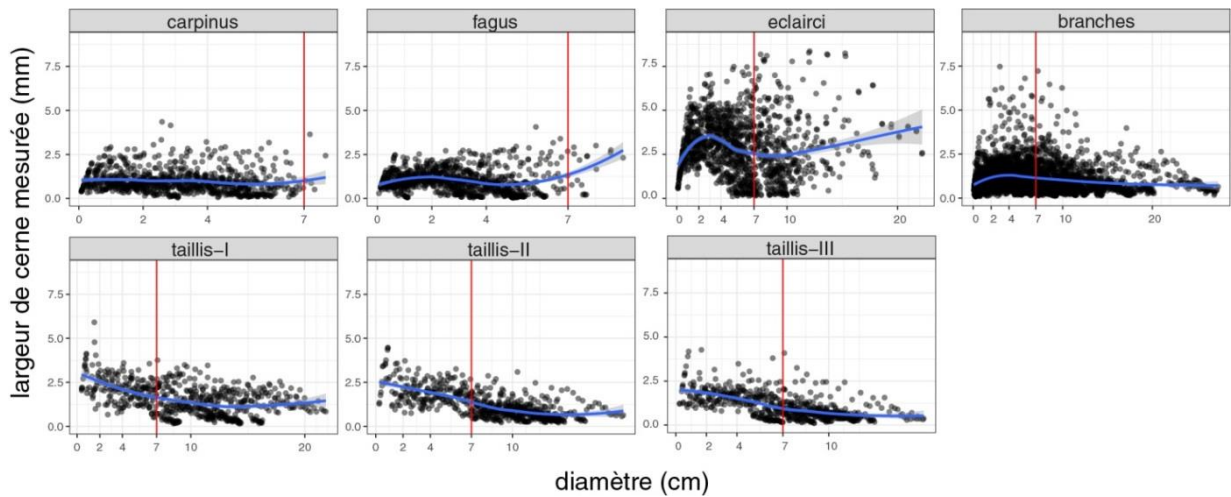


Figure 4.8 : Diamètres calculés (x) de chaque largeur de cerne mesurée (y), par référentiel. Les courbes de tendance en bleu sont exprimées à 95% de confiance. La limite en dessous de laquelle le diamètre est estimé de « charbonnable » (7cm) est représentée en rouge sur l'axe des abscisses.

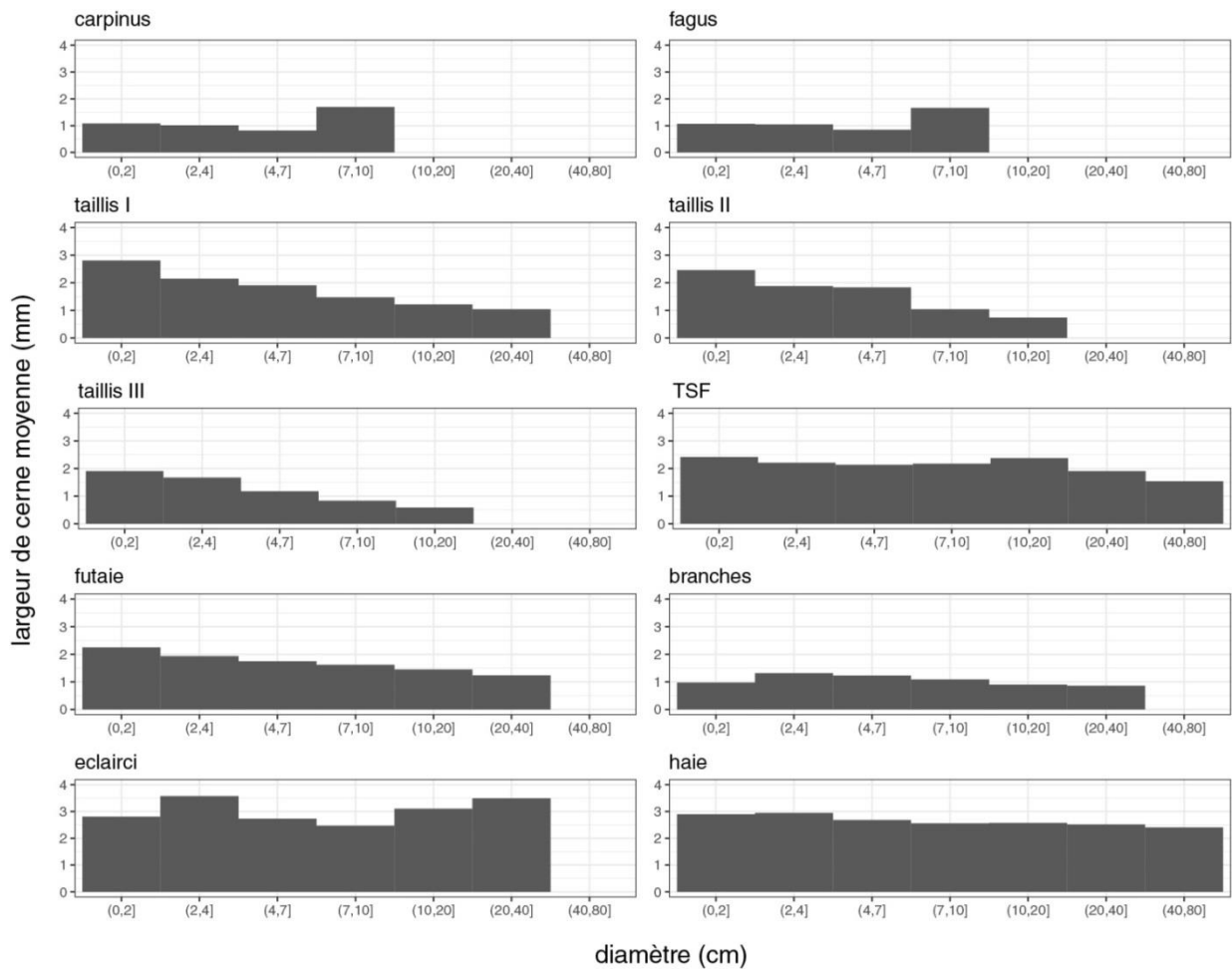


Figure 4.9 : Largeurs de cerne moyennes par classe de diamètre, exprimées par référentiel.

3.2 Les charbons archéologiques

3.2.1 Calibres des bois charbonnés

Dans le cas d'étude présent, 1553 fragments de charbon de bois étaient disponibles, mais le diamètre de seulement 701 d'entre eux a pu être mesuré. En effet, environ la moitié des fragments possédait une face transversale trop petite, ou/et des diamètres trop grands pour respecter les valeurs limites de mesure (angle α et distance D). De plus, les fragments de charbon de charme et de hêtre, qui sont avec le chêne, les taxons les plus représentés dans les spectres anthracologiques des plateformes, ont subi un retrait tangentiel plus fort, proche de la moelle au cours de la pyrolyse. De ce fait, les rayons ligneux étaient fortement incurvés et donc impropres à la mesure du diamètre. Toutefois, lorsque les valeurs limites n'étaient pas respectées, mais que le fragment de charbon ne présentait aucune ambiguïté en face transversale et que la répétition des 5 mesures donnait des résultats cohérents et semblables, nous avons quand même retenu le diamètre moyen mesuré. De même, certains fragments ont fourni des angles négatifs proches de 0° , causés par des rayons subparallèles. Dans ces cas-ci, lorsque la répétition de la mesure de l'angle fournissait des données semblables, nous avons pris le parti de remplacer la valeur de l'angle par 0.5° , afin de l'utiliser dans les calculs du diamètre et éviter de sous-estimer les forts calibres. Par la suite, nous nommerons ces

exceptions de mesure « mesures limites ». De plus, lorsque la moelle était présente, le diamètre fut obtenu en mesurant directement le rayon et en répétant cinq fois la mesure pour moyenner les données.

Les spectres anthracologiques des charbons dont le diamètre a été déterminé (diagrammes en secteurs sur la **figure 4.11**) sont semblables à ceux de l'ensemble des charbons des plateformes de charbonnage (Dupin et al., 2017). Le nombre de fragments mesurés est donc suffisant pour être représentatif du reste des plateformes. De manière générale, quelle que soit la plateforme les classes de diamètres les plus représentées, tant sur les diamètres mesurés que sur les diamètres recomposés, sont celles entre 0 et 4 cm (**Figure 4.11**). Plus précisément, les diamètres recomposés des trois taxons principaux (*Carpinus*, *Fagus*, *Quercus sp.*) sont significativement semblables (Kruskal test, p-value=0.63) à 3.18 cm de moyenne. De plus, même après reconstitution des diamètres minimum des bois charbonnés, la classe maximale représentée est celle à]20-40] cm. Mais de manière générale, quelle que soit la plateforme, les diamètres recomposés sont inférieurs à ceux de la limite proposée par la littérature (<7 cm). Les rares exceptions (49 fragments) sont, pour la plupart, des mesures limites (37 fragments), dont un charbon de post-pionnier à 32 cm (le maximum) et pour le reste des charbons les diamètres ne dépassent pas 23 cm. (**figure 4.10**). Ces exceptions sont composées pour moitié de charbons de chêne prélevés dans la zone à chailles de la forêt où le taillis varié est développé sur un sol épais (gris foncé sur la **figure 4.1**).

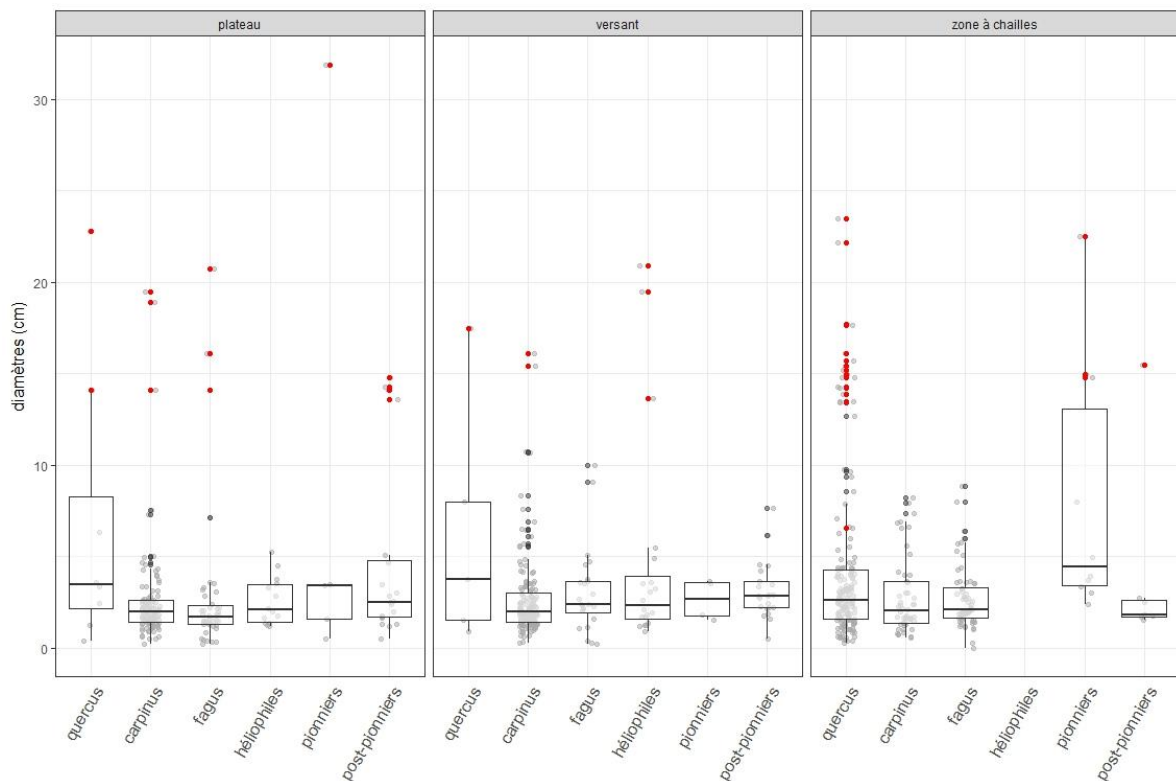


Figure 4.10 : Diamètres mesurés de chaque charbon, exprimé par taxon et par groupe de types de stations. Les individus en rouge ont des diamètres estimés à partir de "mesures limites".

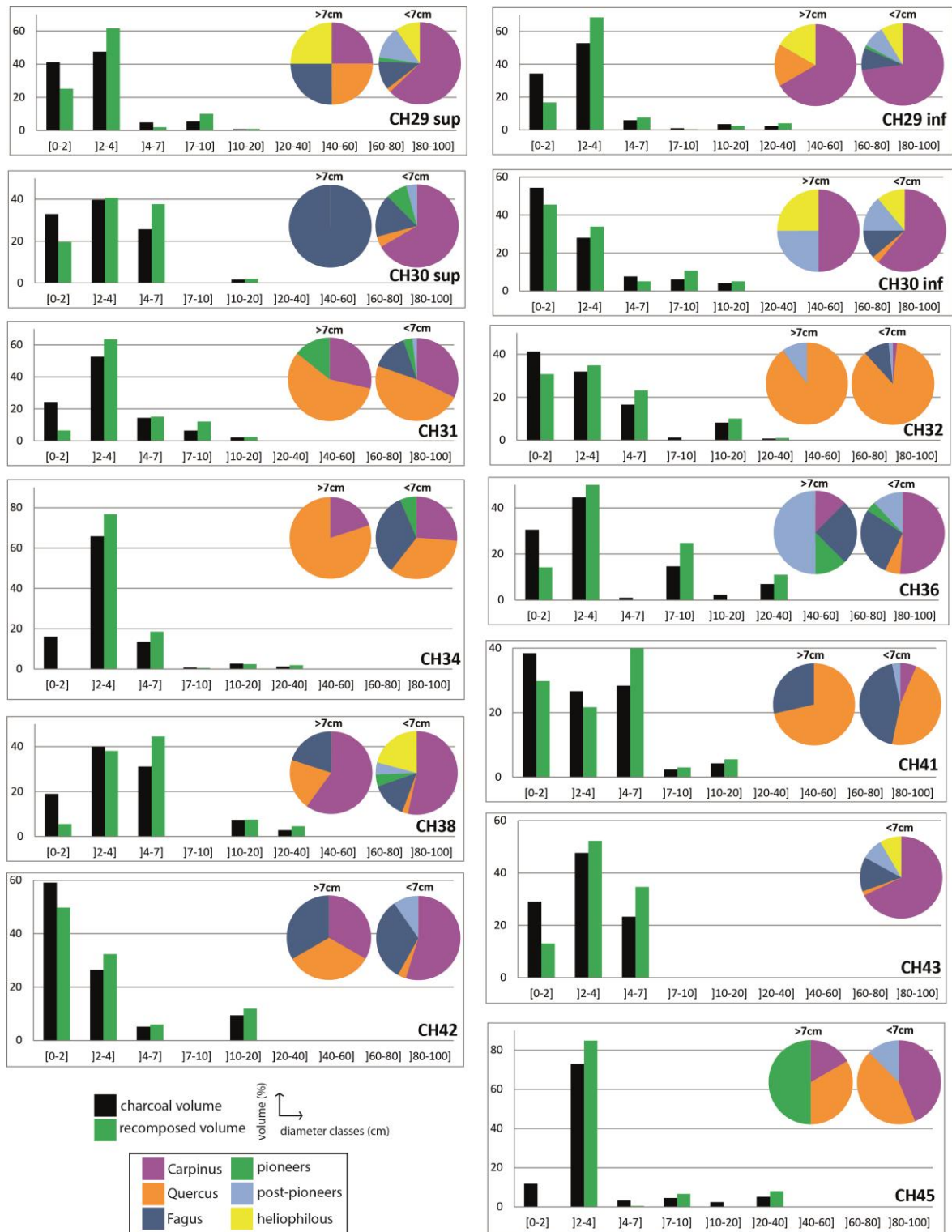


Figure 4.11 : Utilisation du modèle prédictif sur les charbons des plateformes de Chailluz. Les volumes de charbon sont représentés en noir et les volumes recomposés de bois sont en vert. Les taxons identifiés sont représentés pour des diamètres inférieurs et supérieurs à 7cm.

3.2.2 Conditions de croissance des bois charbonnés

La largeur de cernes moyenne par charbon a été calculée d'après les mesures de chaque cerne, dans le but d'homogénéiser les données acquises sur chaque fragment (**figure 4.12**).

Pour les trois groupes de types de stations, la moyenne des largeurs de cerne reste faible (<0.7 mm). Elle est de 0.61 mm sur les charbons des plateformes du versant, de 0.63 mm sur ceux du plateau et de 0.62 mm dans la zone à chailles. Les charbons sur lesquels ces mesures ont été acquises sont représentés essentiellement par le charme et les héliophiles pour le versant, le charme, le hêtre et les post-pionniers pour le plateau et le chêne, le charme et le hêtre pour la zone à chailles. La distribution des données tend vers les très petites valeurs (Les largeurs de cernes minimales des trois groupes de types de stations sont respectivement de 0.17, 0.1, 0.06 mm) et ne dépassent pas les 2.5 mm (Les largeurs de cernes maximales sont respectivement de 1.97, 2.19, 2.47 mm).

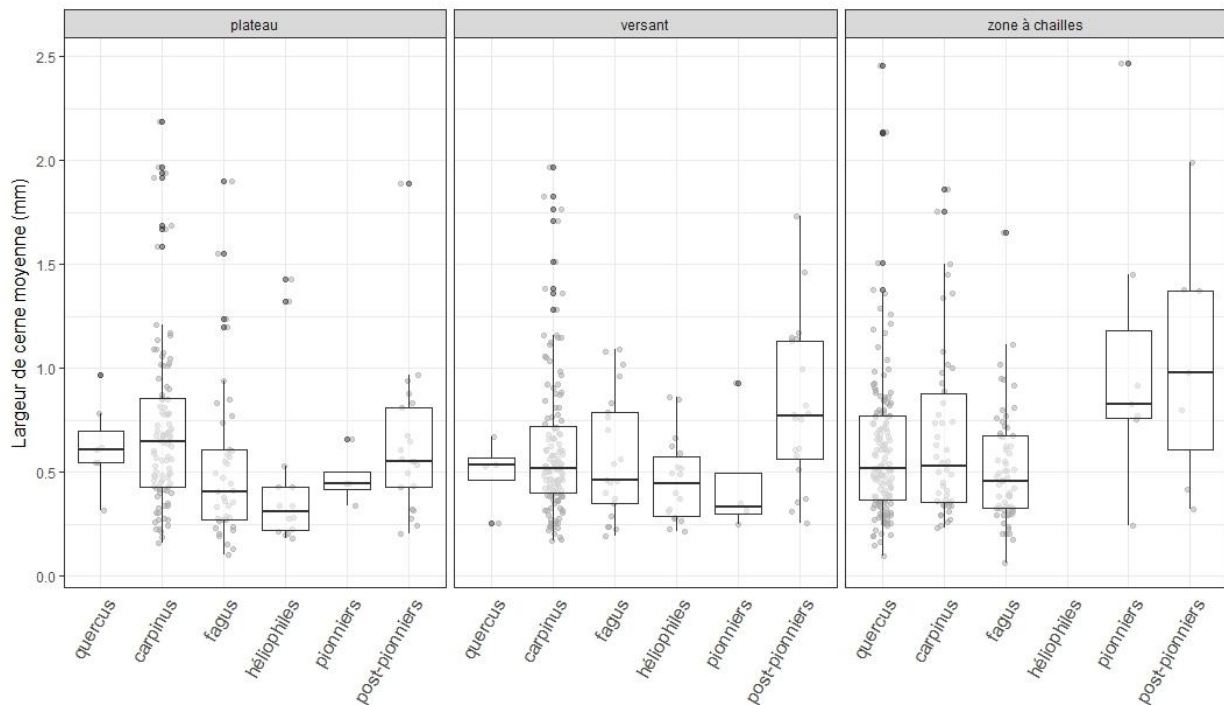


Figure 4.12 : LC moyenne exprimée par taxon et par groupe de types de stations.

3.2.3 Détermination de l'aubier et du duramen des charbons de chêne

Sur l'ensemble des fragments de chêne étudiés (277 charbons), peu d'entre eux n'ont pas pu être identifiés en tant que duramen ou aubier. De manière générale 85% des charbons sont de l'aubier, 11% sont du duramen et 4% n'ont pas pu être déterminés. Cette tendance se répète au sein des trois groupes de types de stations (**figure 4.13**). Systématiquement l'aubier domine avec des valeurs comprises entre 57% (plateau) et 87.5% (versant). Le bois de cœur est également présent dans les plateformes des trois groupes de types de stations, avec des valeurs avoisinant les 20%.

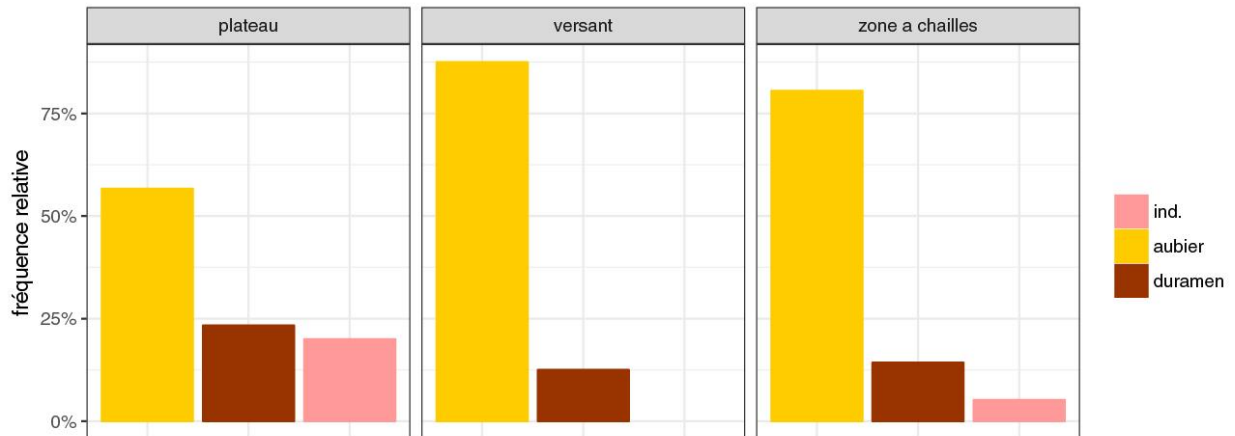


Figure 4.13 : Pourcentages de charbons de chêne identifiés comme étant de l'aubier, du duramen ou non définis, par groupe de types de stations.

3.2.4 Combinaison des paramètres dendro-anthracologiques

3.2.4.1 Diamètres et largeurs de cerne

Pour les trois espèces principales, à savoir le charme, le hêtre et le chêne, les largeurs de cerne augmentent sensiblement avec le diamètre (**figure 4.14**). C'est également le cas pour les autres taxons lorsqu'ils sont regroupés en un seul jeu de données. Toutefois, deux ensembles se distinguent l'un de l'autre par la tendance des largeurs de cerne sur le premier centimètre de diamètre. Chez le charme et les taxons, considérés ici comme secondaires, les largeurs de cerne tendent à diminuer sur le premier centimètre tandis que chez le chêne et le hêtre, elles tendent à augmenter. En exprimant les largeurs de cerne par classe de diamètre, trois ensembles de taxons paraissent se dissocier (graphiques à droite de la **figure 4.15**). Bien que cette représentation graphique lisse l'information concernant le premier centimètre de diamètre (classe]0-2]cm), le chêne et le hêtre s'individualisent par une augmentation de la largeur de cerne moyenne jusqu'à]7-10] cm de diamètre, puis une diminution de celle-ci sur la dernière classe]10-20] cm (tendance atténuée chez le hêtre). Les charbons de charme ont des largeurs de cerne moyennes qui diminuent sur les quatre premiers centimètres de diamètre pour ensuite augmenter jusqu'aux plus gros diamètres. Les largeurs de cerne moyennes des charbons de taxons secondaires semblent se maintenir autour de 0.5 mm quel que soit le diamètre, avec toutefois, une légère tendance en dent de scie. Le gap à]7-10]cm de diamètre est dû au peu de fragments mesurés sur cette gamme de diamètre et qui étaient trop petits pour comporter ne serait-ce qu'un cerne complet. Les gaps à]20-40]cm chez le chêne, le hêtre, sur le versant et la zone à chailles ainsi qu'à]7-10] sur le plateau sont justifiés de la même manière.

A l'échelle du groupe de types de stations, deux ensembles se différencient (graphiques de gauche de la **figure 4.15**). La tendance des largeurs de cerne en fonction du diamètre de la zone à chailles est similaire avec celles du chêne et du hêtre précédemment décrites. Cette ressemblance concorde avec le fait que la quasi-totalité des charbons de chêne ait été identifiée dans la zone à chailles et que cette zone soit composée pour grande partie de ce taxon. En faisant abstraction du gap à]7-10] cm de diamètre des charbons du plateau, on peut remarquer que les fragments de cette zone et ceux du versant de la forêt ont des tendances de croissance de cerne similaires. La largeur de cerne moyenne diminue légèrement

sur les 4 ou 7 premiers centimètres, pour ensuite augmenter jusqu'à 10 et 20 cm, et finalement, diminuer de nouveau jusqu'aux plus gros calibres.

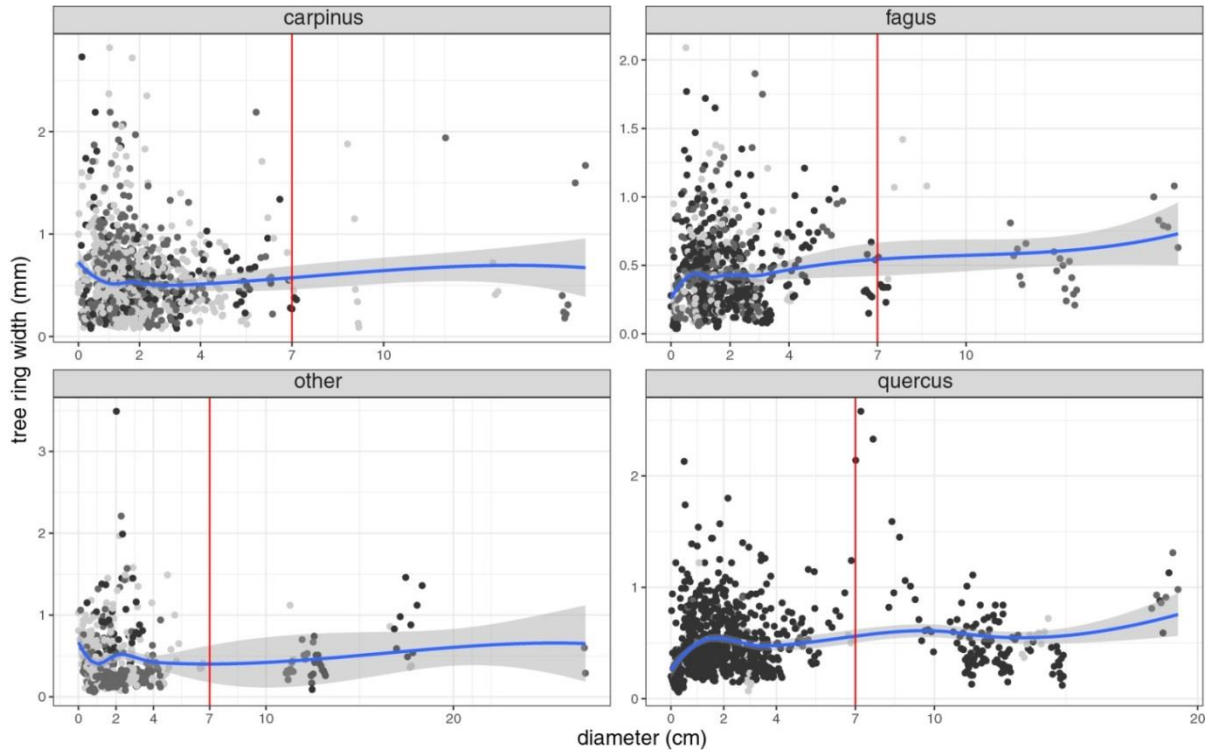


Figure 4.14 : LC (mm) en fonction du diamètre (cm) par taxon. La courbe de tendance en bleu est exprimée à 95% de confiance. La limite en dessous de laquelle le diamètre est estimé de « charbonnable » (7cm) est représentée en rouge sur l'axe des abscisses. La couleur des points correspond aux groupes de types de stations définis en figure 4.1.

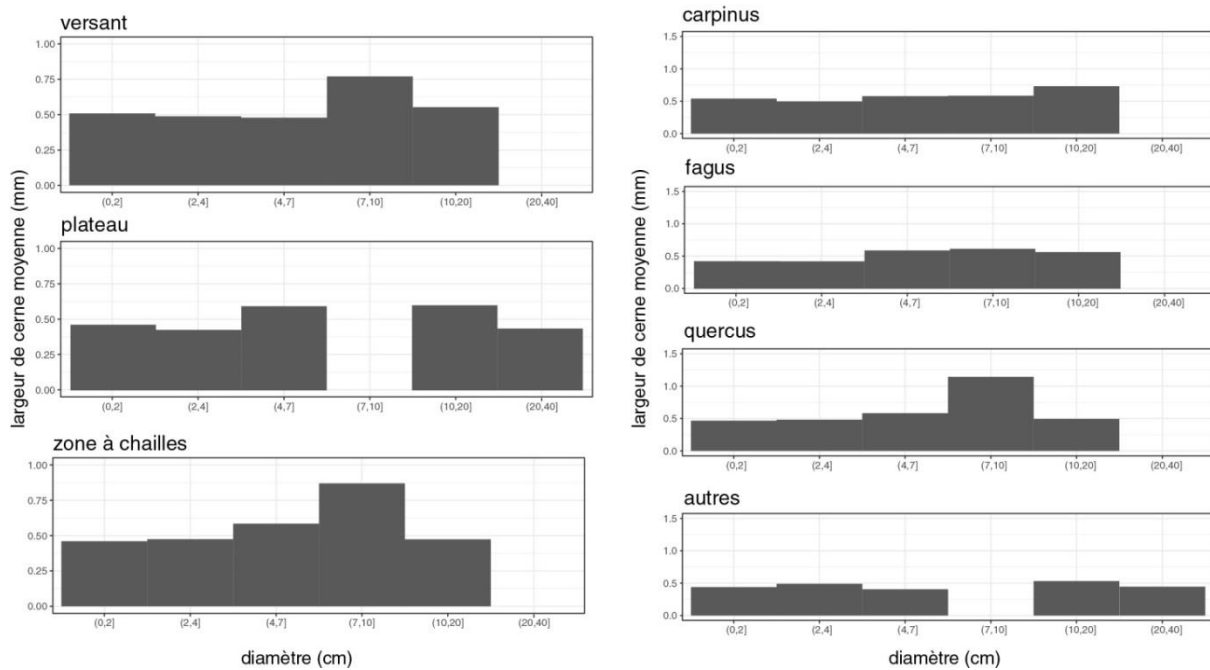


Figure 4.15 : LC moyennes par classe de diamètre, exprimées par groupe de types de stations à gauche, et par taxon à droite.

Au regard de ces deux échelles d'observation, il apparaît que les tendances de largeurs de cerne des différents taxons sont influencées par leurs localisation dans les trois groupes de types de stations et réciproquement. Il convient alors de se placer à l'échelle taxonomique dans chaque groupe de types de stations pour déterminer les conditions de croissance de chaque espèce. La **figure 4.16** permet de visualiser les résultats à cette échelle.

La zone à chailles étant représentée quasi-exclusivement par le chêne et le hêtre, la tendance des largeurs de cerne avec le diamètre n'est pas représentative chez le charme et les taxons secondaires (en bleu sur la **figure 4.16**). Toutefois, il est intéressant de remarquer que la zone à chailles est le seul groupe de types de stations où les charmes et les hêtres ne dépassent pas le diamètre charbonnable (<7 cm). De manière générale, cette zone est composée en majorité de chênes et de hêtre à cernes minces (autour de 0.5 mm), de petits diamètres (<4 cm) et de chêne de diamètres moyens plus forts (de 10 à 15 cm) à cernes minces (autour de 0.5 mm). Quelques chênes à cernes minces (autour de 0.5 mm) d'une vingtaine de centimètres de diamètre peuvent être observés, ainsi que quelques chênes et hêtres de cernes minces (0.5-0.7 mm) de 7-8 cm de diamètre. Concernant le plateau de la forêt, le chêne y est quasi absent et donne donc des résultats de LC non représentatifs (en orange sur la **figure 4.16**). Le peu de charbons ayant pu être analysés dans cette zone est composé pour majorité de charme, de hêtre et de taxons secondaires de petits diamètres (<4 cm) et à largeurs de cerne variées (<0.4 mm pour les taxons secondaires). Toutefois, quelques charbons de plus fort diamètre (vers 12, 15, 20 et 26 cm) s'individualisent pour l'ensemble des espèces. Ils comprennent des largeurs de cernes assez homogènes par taxon (autour de 0.9 mm chez le chêne et le hêtre et autour de 0.4- 0.5 mm chez les taxons secondaires et le charme). Le versant (en vert sur la **figure 4.16**) est essentiellement composé de charbons de faible diamètre (<5 cm) à cernes variés (charme et hêtre) ou clairement inférieur à 0.7 mm (taxons secondaires). De plus, quelques fragments ont pu être mesurés à des diamètres entre 8 et 9 cm et à largeurs de cerne variées (trois charbons de hêtre, 6 charmes et un chêne). Et quelques charmes et taxons secondaires de 14 et 18 cm de diamètre sont identifiés avec des largeurs de cernes entre 0.5 et 0.6 mm. Il est à noter que les tendances de largeurs de cerne des taxons secondaires sont similaires avec celles du plateau de la forêt. La seule différence entre les deux tendances est un écart moyen de 0.1 mm.

La **figure 4.17** schématise les tendances de croissance des cernes par groupe de types de stations (gauche de la **figure 4.15**) ainsi que les caractéristiques des taxons les plus présents influençant ces tendances (**figure 4.16**).

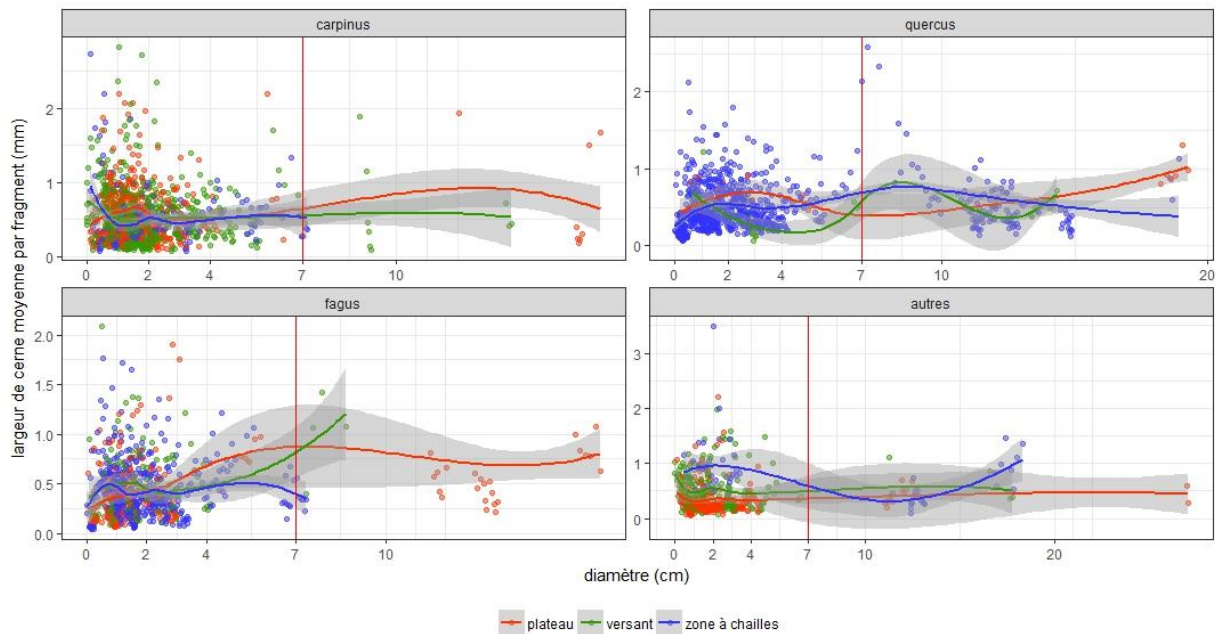


Figure 4.16 : LC en fonction du diamètre par taxon. Les couleurs des points et des courbes de tendance correspondent aux trois groupes de types de stations. Les courbes de tendance sont exprimées à 95% de confiance pour chaque groupe de types de stations. La limite en dessous de laquelle le diamètre est estimé de « charbonnable » (7cm) est représentée en rouge sur l'axe des abscisses.

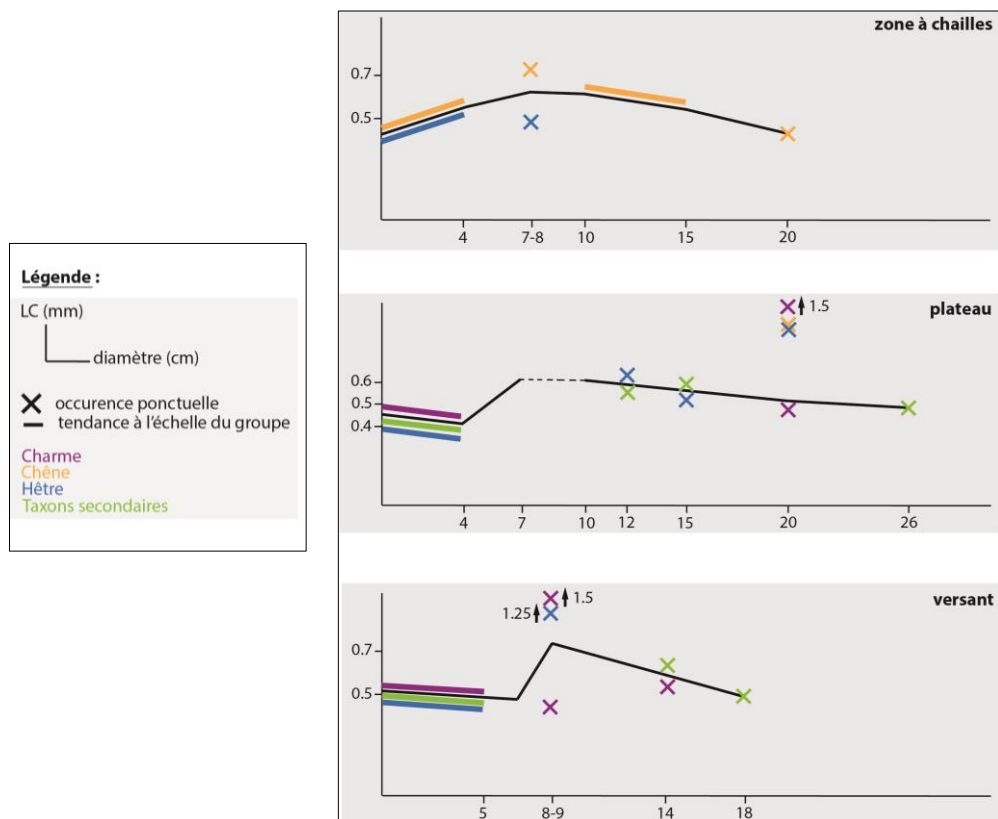


Figure 4.17 : Représentations schématiques par groupe de types de stations des LC moyennes des charbons en fonction de leur diamètre.

3.2.4.2 Classes de diamètres VS aubier/duramen

De manière générale, les charbons de chêne analysés sont composés de près de trois quarts (72.6%) de jeunes tiges (aubier de moins de 7 cm de diamètre) et un quart (23.1%) de tiges matures (**figure 4.18**). Sur ce quart restant, plus de la moitié (53%) est attribué à la zone externe de tiges matures (aubier de plus de 7 cm de diamètre). Moins d'un tiers (28%) est assimilé à la zone interne de tiges matures (duramen de moins de 7 cm de diamètre) et moins d'un cinquième (19%) est attribué à la zone moyenne de tiges matures (duramen de plus de 7 cm). Donc, près de 7/8^{ème} de la totalité des charbons de chêne mesurés (somme des jeunes tiges et des zones externes de tiges matures) ont des diamètres très proches des diamètres réels des tiges dont ils sont issus. Ces diamètres restent petits puisque les charbons de zones externes de tiges matures ont des calibres entre 7 et 23.5 cm.

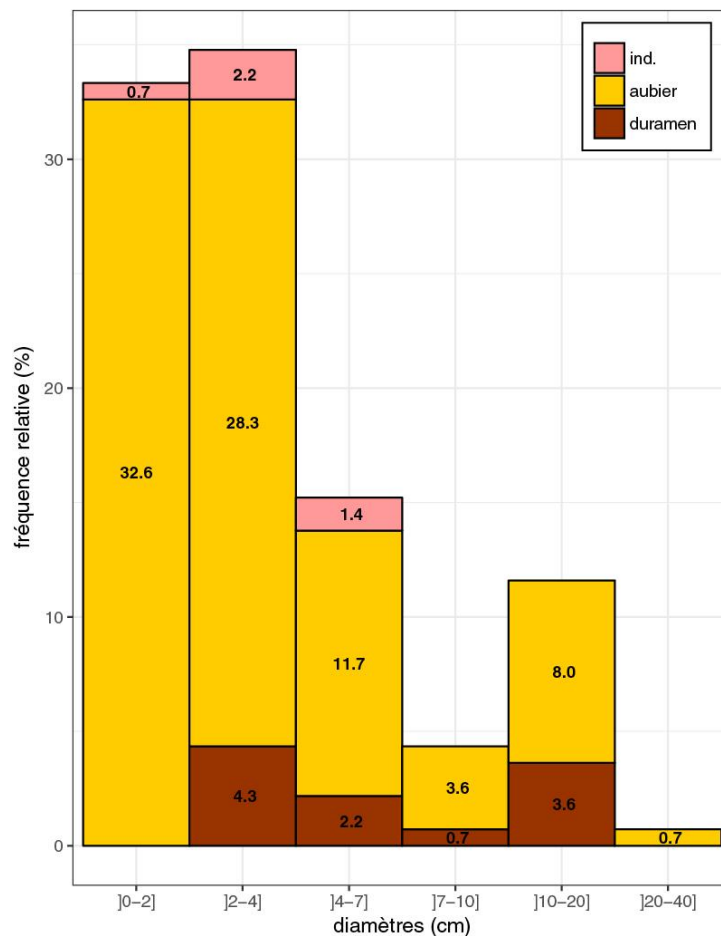


Figure 4.18 : Pourcentages de charbons de chêne attribués à de l'aubier, du duramen ou indéterminés, exprimés par classe de diamètre.

A l'échelle du groupe de types de stations (**figure 4.19**), les résultats ne sont pas significatifs pour les charbons du versant et ceux du plateau puisque seulement 5 fragments de chêne par groupe de types de stations ont pu être caractérisés par leur diamètre et par la distinction aubier/duramen. Toutefois, il est à noter que 9 de ces 10 charbons ont des diamètres très proches du diamètre réel des tiges dont ils sont issus et sont de petit calibre (14.3 cm au maximum). Concernant les charbons de chêne de la zone à chailles, les résultats suivent la même tendance que ceux pour la totalité des charbons analysés, à savoir, trois

quarts (73.5%) des fragments sont issus de jeunes tiges, la moitié (51.8%) des charbons de tiges matures est localisée dans la zone externe, un tiers (31%) dans la zone interne et un cinquième (17.2%) dans la zone moyenne.

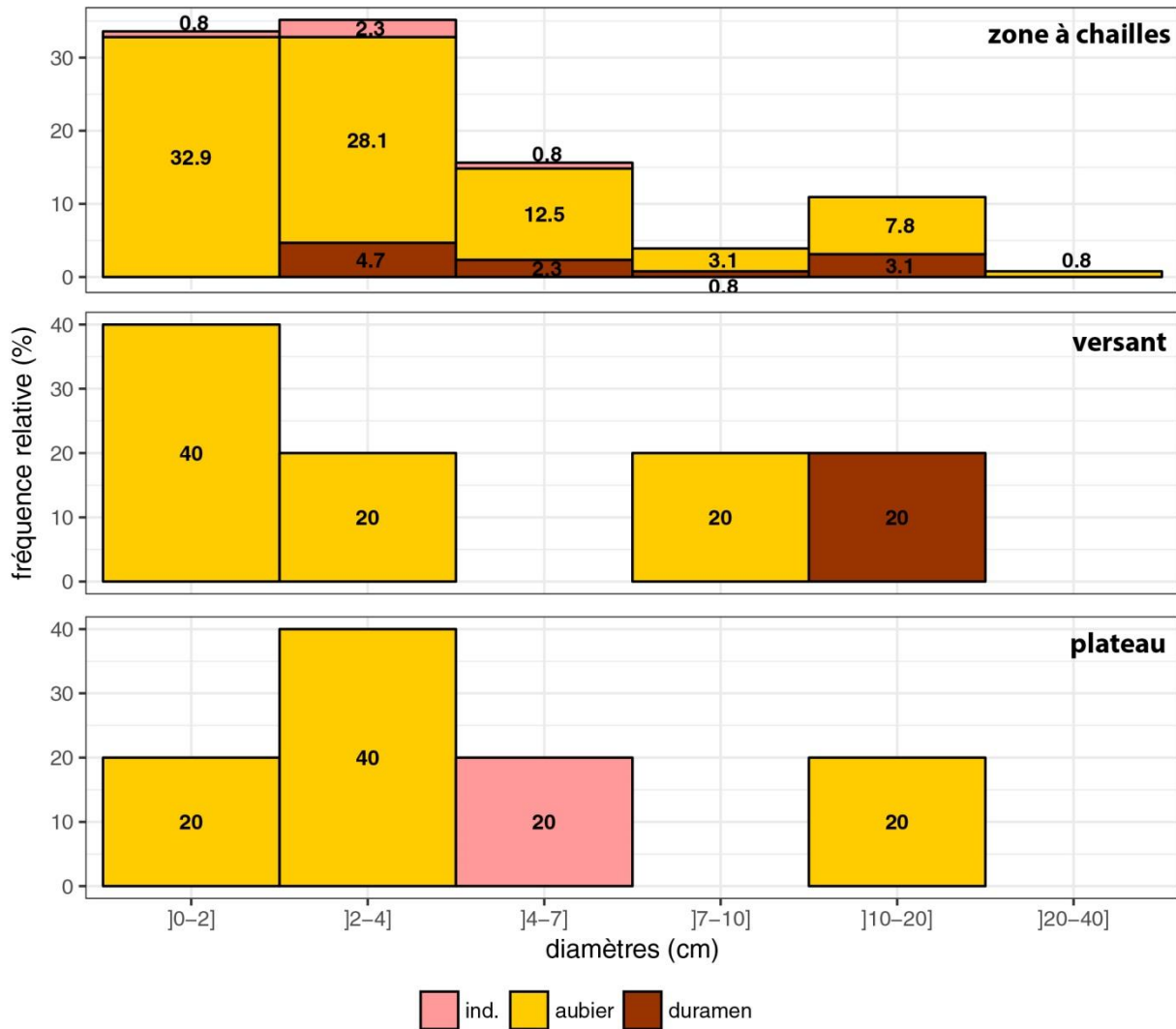


Figure 4.19 : Pourcentages de charbons de chêne attribués à de l'aubier, du duramen ou indéterminés, exprimés par classe de diamètre et par groupe de types de stations.

3.2.4.3 Détermination des parties de tiges de chêne utilisées pour le charbonnage : Les anthraco-groupes

Les résultats des trois paramètres combinés des charbons de chêne permettent de définir des gammes de largeur de cerne par type de tige (figure 4.20). Les charbons définis comme jeunes tiges ont des largeurs de cerne moyennes comprises entre 0.5 et 0.6 mm. Celles des charbons de zone externe de tige mature s'étendent de 0.4 à 0.8 mm. Celles des zones moyennes sont comprises entre 0.6 et 2.1 mm et celles des zones internes de tiges matures de 0.7 à 1 mm. Les charbons dont il n'a pas été possible de déterminer s'il s'agissait d'aubier ou de duramen ont tous des diamètres inférieurs à 7 cm et présentent des largeurs de cerne moyennes comprises entre 0.5 et 0.6 mm. Il est à noter que ce résultat concorde

préférentiellement avec les largeurs de cerne de jeunes tiges plutôt que de zones internes de tiges matures.

Tout comme pour les trois paramètres analysés individuellement, les résultats des trois paramètres combinés ne sont pas significatifs pour les charbons du versant et du plateau de la forêt, en raison du faible nombre de fragments de chêne identifiés et analysés (**figure 4.21**). Ainsi, les résultats de l'ensemble des charbons reflètent ceux des charbons de la zone à chailles.

Ces résultats globaux (**figure 4.20** ou zone à chaille sur la **figure 4.21**) permettent de distinguer des tendances de largeur de cerne propres à chaque type de tige. Chez les jeunes tiges de chêne, les largeurs de cerne moyennes passent de 0.5 mm à 0.6 mm jusqu'à]2-4] cm de diamètre, puis retombent à 0.5 mm sur les derniers centimètres de diamètre. En zone externe de tige mature, les largeurs de cerne diminuent avec le diamètre (de 0.8 à 0.4 mm), tout comme pour les zones moyennes dont les largeurs de cerne passent de 2.1 à 0.6 mm (0.7 mm si on regarde les résultats de la zone à chailles). Les largeurs de cerne des zones internes augmentent avec le diamètre, passant de 0.7 à 1 mm. Enfin, en partant du principe que les charbons de chêne étudiés appartiennent au même groupe de types de stations (zone à chailles), il est plausible de discuter conjointement des résultats des trois zones de tiges matures. Ainsi, les tiges matures de chêne de la zone à chailles présenteraient des largeurs de cerne qui augmenteraient jusqu'à]7-10] cm de diamètre, passant de 0.7 à 2.1 mm, puis diminueraient à 0.6 mm. Sur les derniers centimètres de diamètre les largeurs de cerne augmenteraient légèrement à 0.8 mm pour redescendre à 0.4 mm.

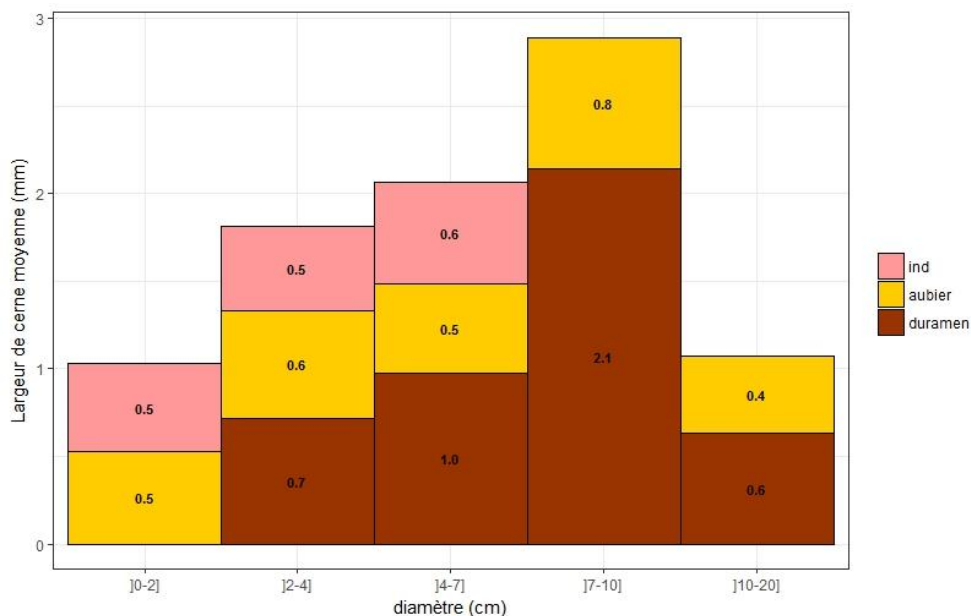


Figure 4.20 : LC moyennes par classe de diamètre des charbons de chêne identifiés comme étant de l'aubier, du duramen ou non attribués.

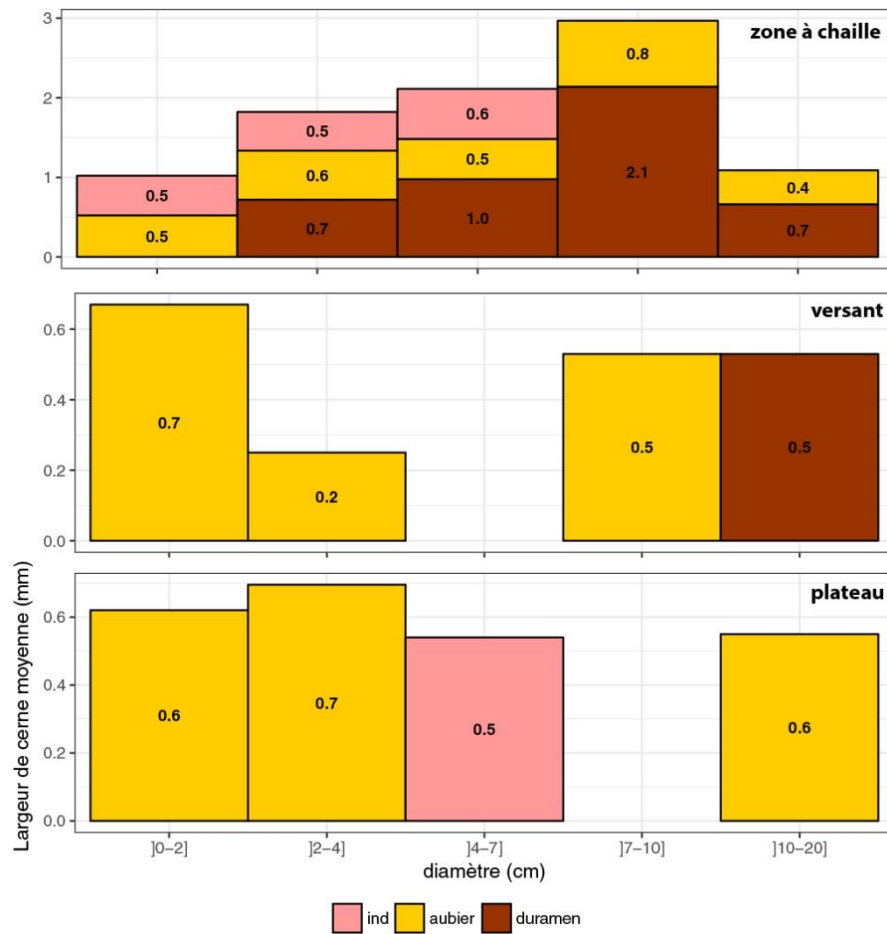


Figure 4.21 : LC moyennes par classe de diamètre des charbons de chêne identifiés comme étant de l'aubier, du duramen ou non attribués, par groupe de types de stations.

La définition des anthraco-groupes totaux (**figure 4.22**) et donc, pour la zone à chailles (**figure 4.23**), atteste d'une nette dominance de l'anthraco-groupe 1 (56%) qui est apparenté à de jeunes tiges à cernes minces (<7 mm), donc des branches. L'anthraco-groupe 2 (jeunes tiges à cernes larges, donc tronc de pied franc ou de taillis) atteint les 20% de représentativité des données, tandis que l'anthraco-groupe 5 (zones externes de tiges matures) atteint tout juste les 10%. Il est important de noter que même en faible proportion, l'ensemble des anthraco-groupes est représenté dans la zone à chailles.

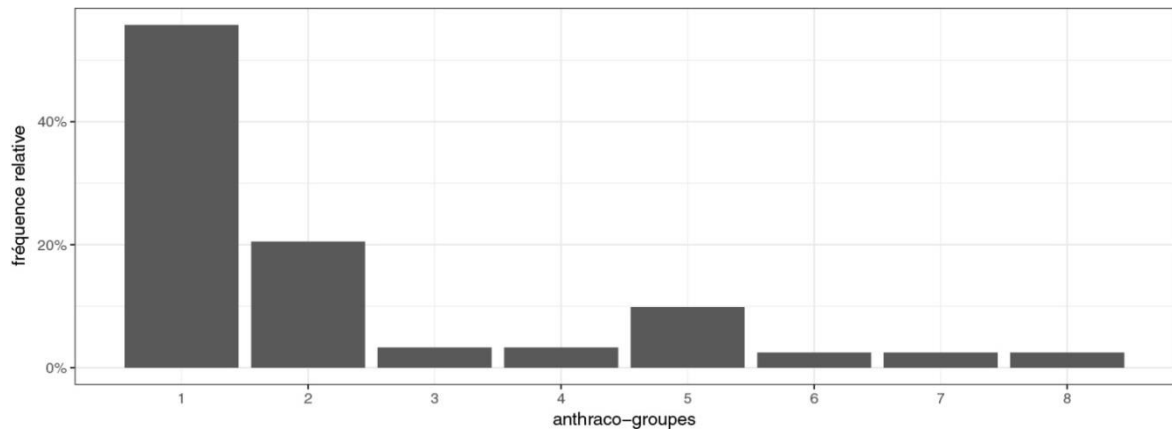


Figure 4.22 : Pourcentages des anthracogroupes identifiés totaux.

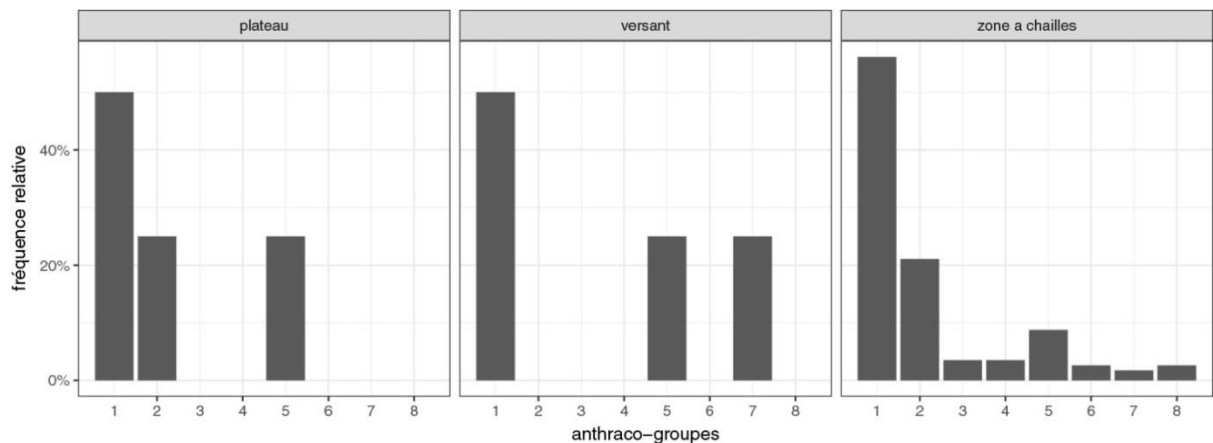


Figure 4.23 : Pourcentages des anthracogroupes identifiés par groupe de types de stations.

4. Interprétations

4.1 Caractérisation des peuplements actuels référentiels

A l'échelle du peuplement (les 6 inventaires botaniques en forêt de Chailluz), il est tout indiqué que les TSF sont plus adaptés pour la pratique du charbonnage que les futaies, puisqu'ils sont jusqu'à 9 fois plus riches en bois de diamètre charbonnable (<7 cm). De plus, l'aire de prospection pour la confection d'une meule de charbon serait jusqu'à 10 fois moins grande dans les TSF, ce qui optimiserait le temps de travail et l'effort du charbonnier. La littérature confirme l'utilisation préférentielle du TSF pour le charbonnage, en précisant que le branchage et le mauvais taillis de ces peuplements forestiers étaient destinés à la production de charbons (Battesti, 1992; Duhamel de Monceau, 1774; Marié de L'Isle, 1835). Plus précisément, d'après les inventaires dendrométriques, les TSF dégradés sont plus riches en brins de diamètre inférieurs à 7 cm que les TSF vieilliss et sont donc le peuplement le plus adapté au charbonnage.

Concernant les taxons présents dans les inventaires, le charme est le plus représenté parmi les tiges de diamètre inférieur à 7 cm, suivi des taxons sciaphiles et héliophiles. Donc, s'ils

étaient présents dans le peuplement forestier au moment du charbonnage, alors ils auraient été les plus utilisés pour la pratique. Ceci à la seconde condition que le charbonnier sélectionnait son bois uniquement par diamètre et non pas par taxon. Enfin, que ce soit dans les TSF vieillis ou dans les futaies, le chêne est uniquement représenté par des tiges de diamètres supérieurs à 7 cm (il est absent dans les TSF dégradés). Donc si le charbonnier utilisait ce taxon pour la fabrication du charbon, alors il devait se fournir dans le houppier de tiges matures ou en fendant des troncs de plus fort diamètre que 7 cm.

D'après les résultats des 10 référentiels, il est possible de caractériser chaque mode sylvicole grâce à l'observation des diamètres des tiges et des largeurs de cerne. La **table 4.1** résume ces données caractérisant chaque mode sylvicole. Les haies, les TSF en conversion et les futaies diffèrent entre eux par les tendances des MLC avec le diamètre. Chez la futaie, la MLC diminue avec le diamètre tandis que pour les haies, elle augmente sur les premiers centimètres de diamètre. Le TSF en conversion se distingue par deux diminutions légères de la MLC, dans les premiers et les derniers centimètres. Les bois de chauffage de charme et de hêtre sont difficilement discernables l'un de l'autre, en revanche, ils se distinguent des autres modes de gestion par une faible MLC quel que soit le diamètre de la tige (<1 mm). De plus, le bois de chauffage en charme et en hêtre ont des diamètres moyens (de 4.7 à 5 cm contre 9.1 cm et plus pour les autres groupes) et maximums (et 9 cm contre 16.2 cm et plus pour les autres groupes) faibles. Ils présentent des MLC basses par rapport aux autres groupes (<1 mm, sauf sur la classe de diamètre]7 ;10]cm. Les éclaircis et les branches de futaie sont caractérisés par une forte dispersion des largeurs de cerne (jusqu'à 8.4 mm contre 5.9 mm au maximum pour le taillis I) et des diamètres calculés (jusqu'à 25 cm contre 13 cm au maximum pour le taillis I), avec toutefois une largeur de cerne moyenne nettement plus faible pour les branches que pour les éclaircis (respectivement 1.1 et 2.9 mm). Le second moyen de les dissocier est la MLC sur les derniers centimètres de diamètre, qui a tendance à diminuer pour les branches et à augmenter pour les éclaircis. Enfin, les trois taillis peuvent être identifiés par les MLC sur l'ensemble des classes de diamètre. Elle est nettement plus forte pour le taillis I qui est moins compétitif que pour le taillis III. Par exemple, pour la classe de diamètre]0-2] cm, la MLC est de 2.8 mm pour le taillis I et de 1.9 mm pour le taillis III. Il est également possible de les dissocier du reste des groupes grâce aux diamètres calculés minimum, qui est nettement plus haut que pour les autres modes de gestion (6.8 cm pour le taillis III, contre 3.8 cm au maximum pour les éclaircis).

Table 4.1: Caractérisations de chaque référentiel (diamètres, LC, MLC). Les données en bleu sont des critères discriminants par rapport aux autres référentiels ou par rapport à un référentiel en particulier (lignes en pointillés). NR= non renseigné

	MLC en fonction diamètre		diamètre calculé (cm)			LC mesurée (mm)			
	tendances	valeurs	minimum	maximum	moyenne	minimum	maximum	moyenne	
haies	↗4↘							2,5	
TSF	↘7↗20↘		NR	NR	NR	NR	NR	1,9	
futaies	↘							1,4	
carpinus	↘7↗	basse < 1	1,1 à 2,3	basse 9	basse 4,7 à 5	0,03 à 0,2	4,2	1	
fagus		sauf]7-10]cm							
éclairci	↗4↘10↗			22,2			haute 7,5 à 8,4	+ haute 2,9	
branches	↗4↘			haute 27,4			+ basse 1,1		
taillis I		+ haute 2,8 à]0-2]cm	haute 6,8 à 9	15,4 à 21,2	9,1 à 15,4				
taillis II	↘							4,3 à 5,9	1,2 à 1,5
taillis III		+ basse 1,9 à]0-2]cm							

4.2 Discussion générale : Comparaison entre les charbons des plateformes de Chailluz et les référentiels

4.2.1 Les calibres de bois utilisés pour la production de charbons à Chailluz

4.2.1.1 Utilisation de petits diamètres de bois

L'utilisation usuelle de bois de petit calibre pour le charbonnage, au moins du IV^{ème} au XIX^{ème} siècles, est confirmée par les sources historiques en raison de la meilleure qualité des charbons produits, en particulier par les brins de cépée (Amigues, 1993). Par ailleurs, si la plus grande partie des charbons analysés pour la présente étude fournit bien des diamètres recomposés inférieurs à 7 cm (la moyenne des trois taxons principaux est de 3.18 cm), ils sont néanmoins bien inférieurs à ce que les charbonniers semblaient utiliser : 5 à 10 cm dans la littérature, correspondant à un taillis moyen de 15 à 20 ans (Duhamel de Monceau, 1774; Malepeyre, 1836; Marié de L'Isle, 1835; Perles, 1977). Une étude dendro-anthracologique de plateformes de charbonnage dans le sud de l'Allemagne, confirme cette gamme de diamètre fournie par la littérature (Nelle, 2002). Sur ce site, certaines plateformes ont des diamètres moyens de charbons entre 10 à 12 cm (mesure sur cible).

Cette différence significative de diamètre entre les charbons des plateformes de Chailluz et la littérature peut alors être expliquée par quatre hypothèses non exclusives :

- Les diamètres recomposés obtenus par le modèle Dufraise peuvent être significativement inférieurs aux diamètres réels des tiges utilisés dans les charbonnières de la forêt de Chailluz. En effet, le facteur « perte au feu » n'ayant pas été corrigé sur les données sorties du modèle les diamètres supérieurs à 10 cm sont sous-estimés (paragraphe 2.2.1.2). Cette hypothèse est d'autant plus plausible que l'outil trigonométrique de mesure des diamètres des charbons de bois sous-estime d'une vingtaine de pourcents les diamètres supérieurs à 10 cm et surestime d'une dizaine de pourcents les diamètres en-dessous (paragraphe 2.2.1.1).
- Les charbonniers de la forêt de Chailluz auraient utilisé des tiges plus jeunes que 15-20 ans et donc, de plus petit calibre. Cette hypothèse peut être vraie pour les tiges de taillis, en revanche, la présence de duramen dans les tiges matures (10.8% des charbons de chêne : **figure 4.18**) atteste de l'utilisation de chênes d'au moins 20-25 ans.
- Puisque le prélèvement des charbons a été réalisé le plus au centre des plateformes possible (Dupin et al., 2017), il est probable que ce diamètre moyen de 3.18 cm soit influencé par les diamètres des branchages utilisés pour l'allumage de la meule. En effet, il était de coutume, dans le Languedoc (sud de la France) par exemple, d'allumer et d'alimenter la meule avec près d'un demi stère de vieux bois sec d'une dizaine d'années, ayant des diamètres ne dépassant pas 3 cm (Battesti, 1992). Cette hypothèse, bien que logique, semble fautive puisque le diamètre moyen recomposé des bois utilisés concorde avec ceux de deux autres travaux en Lozère et en Belgique, utilisant la même méthode de mesure que pour la présente étude, mais sur la couche carbonneuse entière des plateformes (Deforce et al., 2013; Paradis Sandrine, 2007). Plus précisément, en Lozère, un niveau de charbonnage contient 86% de charbons de diamètre inférieur à 5 cm et sur les 10 sites belges, le mode et la moyenne des diamètres mesurés se situent sur la classe]0-5] cm.
- Le diamètre moyen recomposé de la présente étude (3.18 cm) est légèrement inférieur aux diamètres moyens des bois de chauffage de charme et de hêtre calculés en référentiel (4.7 à 5 cm). Le bois utilisé pour la fabrication du charbon pouvait alors être le même que celui du

bois de chauffage. La littérature confirme d'ailleurs que le taillis de 15-20 ans est la même source de bois pour ces deux utilisations (Duhamel du Monceau, 1774; Malepeyre, 1836).

4.2.1.2 Utilisation conjointe de petits et gros diamètres de bois

La détermination des anthraco-groupes sur les fragments de chêne est non seulement un indice de l'utilisation de bois de diamètre charbonnable (*cf. supra*), mais également de l'exploitation de tiges de gros calibres. En effet, près d'un quart des charbons de chêne appartient à une partie de tige mature et donc à des tiges de diamètre au-dessus du diamètre « charbonnable ». De plus, les mesures de charbons de diamètre supérieur à 10 cm étant toutes des mesures limites, cela implique bien que la méthode trigonométrique sous-estime les diamètres forts, tels que Garcia Martinez and Dufraisse (2012) l'ont démontré. Ainsi, bien qu'apparaissant peu dans les diagrammes dendro-anthracologiques de la forêt de Chailluz, les tiges de diamètres supérieurs à 10 cm peuvent avoir été utilisées pour le charbonnage en plus grande quantité, ou/et avec des diamètres bien plus forts que ce que donnent les résultats. Cette sous-estimation touche en particulier le chêne puisqu'il représente la majeure partie des charbons de plus de 7 cm de diamètre dans les plateformes de Chailluz.

De nombreuses sources historiques confirment l'utilisation conjointe de charbonnettes de faibles et de gros calibres en précisant qu'elle permet une meilleure maîtrise de la carbonisation, puisque les petites branches comblaient les vides laissés entre les tiges qui, bien souvent, étaient tortueuses (Duhamel de Monceau, 1774). Cette utilisation permet également un meilleur rendement de charbons (Battesti, 1992; Izard, 1992). Un charbonnier franc-comtois du XX^{ème} siècle mentionne même l'utilisation de petits et de gros calibres refendus pour la confection des meules à charbon (Bouchev, 1969). Une représentation du XVI^{ème} siècle peint également l'utilisation de tiges de fort calibre refendues pour le charbonnage (Pierre and Gaxatte, 2011). En revanche, Duhamel du Monceau (1774) démontre qu'il est préférable de réduire en charbon les taillis de 18 à 20 ans, plutôt que le branchage ou le gros bois. D'après lui la carbonisation du gros bois entraîne la consommation de la partie périphérique de la bûche avant que le centre ne soit réduit en charbon.

4.2.2 Utilisation de la tige entière (tronc et houppier)

Certains indices dendro-anthracologiques des charbons des plateformes de Chailluz confirment l'utilisation de la tige entière pour le charbonnage. En effet, l'augmentation des LC avec le diamètre, visible pour l'ensemble des taxons (figure 4.14), révèle l'usage de tiges de petits diamètres à faible croissance et de tiges de gros diamètre à forte croissance. Cette tendance connote l'exploitation de la tige entière, ou un éclaircissement du peuplement (Dufraisse et al., 2017b). De même, la présence de l'ensemble des anthraco-groupes (moitié branches, moitié troncs de tiges matures ou jeunes tiges) dans les plateformes de la forêt de Chailluz confirme également l'utilisation des arbres dans leur entier. De plus, comme démontré précédemment (paragraphe 4.2.1.1), la ressource ligneuse pour le charbonnage devait être la même que pour le bois de chauffage, à savoir un taillis de 15-20 ans mais pas seulement. En effet, les diamètres maximaux des charbons archéologiques (30 cm) étant bien supérieurs aux diamètres maximaux des bois de chauffage de charme et de hêtre mesurés en référence (9 cm), les charbonniers devaient alors prélever leurs bois, certes dans le taillis, mais également dans la futaie où les troncs de pieds francs sont de plus gros diamètres.

Finalement, Izard (1992) confirme l'utilisation de la tige entière des bois pour la fabrication du charbon en précisant que la pratique était tellement forte et la ressource, par moment, tellement amenuisée, que tous types de bois pouvaient être utilisés dans les meules à

charbon, du petit au gros calibre, du houppier au tronc, en passant par les souches. Par ailleurs, certaines utilisations du charbon prévalaient le bois de futaie. C'est le cas en région parisienne et en Bretagne (France) où les charbonniers utilisaient le bois de futaie pour la fabrication de charbon à destination des forges (Belhoste, 1990; Boissiere, 1990).

L'utilisation en grande quantité de branches pour la fabrication du charbon de la forêt de Chailluz est confirmée par les indices dendro-anthracologiques et par la comparaison avec les référentiels. En effet, l'ensemble des inventaires fournit bien moins de bois de diamètre charbonnable que ce qu'il est observé dans les places à charbon de Chailluz. Cette différence peut être expliquée par la mesure du diamètre des tiges à hauteur de poitrine dans les inventaires et n'incluant donc pas le houppier. Ceci suggère alors l'utilisation de branches pour le charbonnage. De manière moins équivoque, l'identification de 56% d'anthraco-groupe 1 des charbons de chêne confirme l'utilisation de branches. D'ailleurs, les tendances des LC avec le diamètre des jeunes tiges (anthraco-groupes 1 et 2) suivent bien celles des branches et des haies de référence (augmentent jusqu'à 4 cm puis diminuent). Plus précisément, la dispersion des diamètres des jeunes tiges du corpus archéologique (23 cm en retirant le charbon de 32 cm de diamètre) concorde mieux avec celle des branches de référence (27.4 cm) que celle des haies (70 cm).

4.2.3 Peuplements présents au moment du charbonnage et utilisation des différentes espèces pour la fabrication du charbon de bois

Sur le plateau et le versant de la forêt de Chailluz, les tendances des LC avec le diamètre des charbons concordent avec celles des TSF de référence (diminution sur les premiers centimètres, puis augmentation et diminution sur les derniers centimètres), laissant ainsi présager de la présence de TSF dans ces deux groupes de types de stations. Toutefois, les diamètres modaux des TSF des inventaires dendrométriques, pris également pour référence, sont bien au-dessus du diamètre moyen des charbons archéologiques (4-7 cm pour les TSF de référence, contre 3.18 cm pour les charbons des plateformes), en particulier les deux TSF vieilliss (mode à 40-60 cm). Donc, le taillis du TSF devait être utilisé en grande quantité pour le charbonnage puisqu'il influencerait alors fortement le diamètre moyen des charbons des plateformes. Cette hypothèse paraît plausible au regard des diamètres moyens des bois de chauffage pris pour référence (4.7 à 5 cm) provenant de taillis de TSF. De même, de nombreuses études confirment que le taillis pousse d'abord en hauteur puis en diamètre (Billamboz, 2014, 2003; Deforce and Haneca, 2015; Haneca et al., 2006), donnant donc des LC qui diminuent avec le diamètre. Inversement, les tendances différentes entre les branches de référence et les charbons du versant et du plateau de la forêt tendent à prouver que les branches de pieds francs ne devaient pas être autant utilisées pour le charbonnage que le taillis dans ces deux groupes de types de stations.

Par ailleurs, pour les trois groupes de types de stations (versant, plateau et zone à chailles), les LC des charbons archéologiques sont globalement bien en dessous des LC des référentiels (moyenne des charbons des plateformes : 0.6 mm, contre 1 mm au minimum pour les référentiels) (figure 4.24). La moyenne des LC des jeunes tiges, par exemple, est de 0.5-0.6 mm, tandis que celle des branches de référence est de 1.1 mm. Cette différence significative peut être expliquée par l'influence de deux facteurs différents sur les LC. En effet, proche de la moelle, les LC sont influencées par l'âge de la tige, tandis que loin de la moelle, elles sont influencées par des facteurs environnementaux (Girardclos et al., 2017). Ainsi, les peuplements présents au moment du charbonnage devaient présenter des conditions de

croissance peu favorables, telles qu'un milieu assez fermé, ou en tout cas, présentant un degré de compétitivité élevé.

Ainsi, les trois groupes de types de stations étaient des TSF constitués de futaie d'au moins 20-25 ans (paragraphe 4.2.1.1 hypothèse 2) avec un taillis de 15-20 ans dont le facteur d'élancement serait très fort, plus compétitif encore que le taillis III de référence. La comparaison des trois taillis de référence permet effectivement de supposer que les cernes sont d'autant plus minces que le taillis est compétitif.

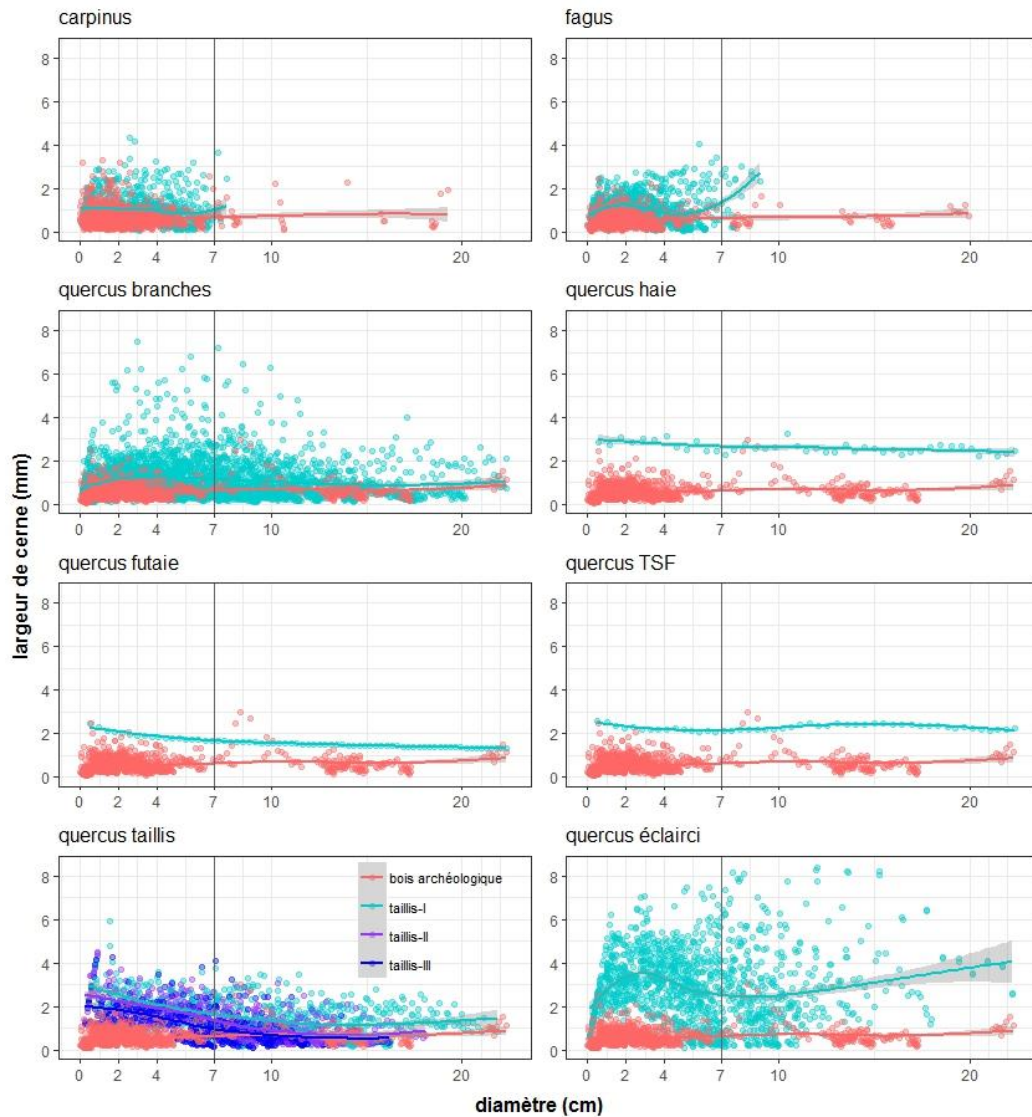


Figure 4.24 : Confrontation des LC moyennes par diamètre des charbons archéologiques avec celles des référentiels. Les données en rouge sont les mesures archéologiques. Celles en bleu sont celles des référentiels. Les courbes de tendance sont exprimées à 95% de confiance.

4.2.3.1 Sur le versant

Dans le détail, la comparaison avec les inventaires botaniques et la forte présence des héliophiles sur le versant tendent à démontrer la présence au moment du charbonnage d'un TSF à taillis dégradé sur ce groupe de types de stations.

Le taillis était constitué de charme, de hêtre et d'héliophiles ainsi que de quelques chênes, laissant présager la présence d'un taillis varié, et utilisé pour le charbonnage. Certaines sources historiques attestent effectivement de l'utilisation des héliophiles pour le charbonnage. Dans une encyclopédie du XIX^{ème} siècle par exemple, le merisier est mentionné comme étant un taxon utilisé, entre autre, pour la production de charbon (Malepeyre, 1836). De même, les forges de l'époque utilisaient les pommiers et les aliziers en charbon, au même titre que d'autres bois durs tels que le cornouiller, le chêne, le hêtre, le charme ou l'érable. Izard (1992) affirme que le charbonnier récoltait sa matière première au plus proche et au plus accessible de sa plateforme. « Les arbres fruitiers ont alors été sacrifiés à l'activité et au besoin ». Peu d'essences n'ont pas été victimes du charbonnage.

La futaie pouvait ici être composée de chêne et de hêtre, compte tenu de l'utilisation presque exclusive de ces taxons en tiges de gros diamètre. Les héliophiles, tels que les merisiers, présents dans la végétation actuelle du site, peuvent également avoir fait partie de la futaie puisque les charbons de ces taxons secondaires ont plus de diamètre supérieur à 7 cm que de diamètre charbonnable.

4.2.3.2 Sur le plateau de la forêt

Sur le plateau de la forêt de Chailluz, le peuplement forestier devait être composé d'un TSF où le taillis était varié comme sur le versant, avec toutefois moins d'héliophiles, laissant présager un milieu moins ouvert et moins dégradé. La tendance de LC, avec le diamètre des charbons du plateau, présente une diminution plus marquée sur les quatre premiers centimètres de diamètre par rapport au versant, laissant effectivement présager la présence d'un taillis plus compétitif. La futaie, quant à elle, devait compter du chêne, du hêtre et des post-pionniers confirmant la présence d'un TSF plus vieilli que sur le versant.

Il est intéressant de constater que les taxons héliophiles présents dans ces plateformes, étaient uniquement issus de tiges de petits calibres (moins de 7 cm de diamètre) et, de ce fait, n'étaient pas exploités de la même manière que sur le versant. Les héliophiles devaient en effet être plus présents dans la futaie que dans le taillis.

4.2.3.3 Dans la zone à chailles

Ici, l'utilisation en grande quantité des branches de pieds francs de chêne pour le charbonnage influence grandement la tendance des LC en fonction du diamètre (**figure 4.17**). Par ailleurs, la présence du taillis est confirmée par l'identification de l'antraco-groupe 2, à hauteur de 20% des charbons de chêne analysés.

Donc le TSF de ce groupe de types de stations était composé d'une futaie de chêne et de hêtre, dont au moins le chêne était utilisé sur la tige entière pour le charbonnage. Par ailleurs, certains indices dendro-anthracologiques tendent à montrer que le hêtre, le charme et les post-pionniers étaient utilisés pour la fabrication du charbon uniquement en branches de tiges matures ou en taillis. En effet, les charbons de ces taxons ont tous des calibres inférieurs à 7 cm. De plus, leurs tendances de LC avec le diamètre concordent avec celles des haies de références, des branches et des éclaircis. Plus précisément, leurs moyennes de LC se rapprochent plus de celle des branches.

Enfin, l'absence d'héliophiles dans les spectres anthracologiques (Dupin et al., 2017) de cette zone connote un espace moins dégradé et moins ouvert que sur le versant et sur le plateau de la forêt.

5. Conclusion et perspectives

Les paramètres dendro-anthracologiques (LC et diamètres) et taxonomiques des charbons des plateformes de charbonnage de la forêt de Chailluz, comparés aux paramètres de différents types de peuplements référentiels, ont permis de déterminer les types de peuplement présents dans cette forêt au moment du charbonnage. Les caractéristiques du bois utilisé par cette pratique ont également pu être déterminées. Les biais apportés par l'utilisation de l'outil trigonométrique de mesure des diamètres des charbons de bois et par l'utilisation du modèle prédictif, contraignent finalement peu, voire pas, l'interprétation des structures de peuplements présents au moment du charbonnage. La caractérisation des peuplements s'est portée essentiellement sur la tendance de croissance avec le diamètre, plus que sur les diamètres eux-mêmes. De plus, même en ajoutant les facteurs de correction aux largeurs de cerne mesurées, les données archéologiques restent bien inférieures à celles des peuplements actuels référentiels. Toutefois, il serait de bon ton, à titre méthodologique, de définir un facteur de correction de l'outil trigonométrique au-delà de 20 cm de diamètre. La signature diamétrale des charbons de bois estimée par cet outil serait alors plus proche de leur signature réelle. Dans la même idée, il serait judicieux de définir un facteur de correction du retrait du bois pour chaque taxon analysé. Les données sortantes du modèle prédictif de reconstitution et de décomposition seraient alors plus proches des diamètres réels des bûches carbonisées.

Sources et bibliographie

- Amigues, S., 1993. Recherches sur les plantes de Théophrastes, traduction.
- Arnould, E., 1978. Métallurgie au bois et utilisation de la forêt. *Revue forestière Française* 6, 459–477. doi:10.4267/2042/21254
- Battesti, V., 1992. Une charbonnière expérimentale. university Montpellier II, Montpellier.
- Becker, M., Nieminen, T.M., Geremia, F., 1994. Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂. *Annales des Sciences Forestières* 51, 477–492. doi:10.1051/forest:19940504
- Belhoste, J., 1990. Une sylviculture pour les forges, XVIIe-XIXe siècles, in: *Forges et Forêts : Recherches Sur La Consommation Proto-Industrielle de Bois*. éd. de l'école des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, pp. 219–261.
- Billamboz, A., 2014. Regional patterns of settlement and woodland developments: Dendroarchaeology in the Neolithic pile-dwellings on Lake Constance (Germany). *Holocene* 24, 1278–1287.
- Billamboz, A., 2003. Tree rings and wetland occupation in southwest Germany between 2000 and 500 BC: dendroarchaeology beyond dating. *Tree Ring Research* 59, 37–49.
- Boissiere, J., 1990. La consommation parisienne de bois et les sidérurgies périphériques: essai de mise en parallèle (milieu xve-milieu xixe siècles), in: *Forges et Forêts : Recherches Sur La Consommation Proto-Industrielle de Bois*. éd. de l'école des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, pp. 29–56.
- Bond, W.J., Woodward, F.I., Midgley, G.F., 2005. The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytologist* 165, 525–538. doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01252.x
- Bouchev, E., 1969. le charbonnier dans les bois. Folklore comtois, Besançon.
- Bowman, D.M.J.S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W.J., Cochrane, M.A., D'Antonio, C.M., DeFries, R., Johnston, F.H., Keeley, J.E., Krawchuk, M.A., Kull, C.A., Mack, M., Moritz, M.A., Pyne, S., Roos, C.I., Scott, A.C., Sodhi, N.S., Swetnam, T.W., 2011. The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography* 38, 2223–2236. doi:10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x
- Braadbaart, F., Poole, I., 2008. Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts. *Journal of archaeological science* 35, 2434–2445.
- Bru-Malgras, C., 2002. Le savoir-faire ecclésiastique et monastique en matière de vignes et de forêts., in: Corvol, A. (Ed.), *Forêt et Vigne, Bois et Vin. XVIIe-XXe Siècle*. l'Harmattan, Paris, pp. 185–204.
- Cochard, H., Bréda, N., Granier, A., Aussenac, G., 1992. Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q pubescens* Willd, *Q robur* L). *Annales des Sciences Forestières* 49, 225–233. doi:10.1051/forest:19920302
- Cutter, B.E., Cumbie, B.G., McGinnes, E.A., 1980. SEM and shrinkage analyses of Southern Pine wood following pyrolysis. *Wood Science and Technology* 14, 115–130. doi:10.1007/BF00584041
- Davasse, B., 1989. Restitution de la dynamique historique du paysage forestier des Pyrénées ariégeoises par l'anthraanalyse des charbonnières, in: *Bioceneses D'altitude 3. Montagnes d'Europe*. Centre Pyrénéen de Biologie et Anthropologie des Montagnes, Pau.
- Davidsson, K., Pettersson, J., 2002. Birch wood particle shrinkage during rapid pyrolysis. *Fuel* 81, 263–270.
- Deforce, K., Boeren, I., Adriaenssens, S., Bastiaens, J., De Keersmaeker, L., Haneca, K., Tys, D., Vandekerckhove, K., 2013. Selective woodland exploitation for charcoal production.

- A detailed analysis of charcoal kiln remains (ca. 1300-1900 AD) from Zoersel (northern Belgium). *Journal of Archaeological Science* 40, 681–689. doi:10.1016/j.jas.2012.07.009
- Deforce, K., Haneca, K., 2015. Tree-ring analysis of archaeological charcoal as a tool to identify past woodland management: The case from a 14th century site from Oudenaarde (Belgium). *Quaternary International* 366, 70–80. doi:10.1016/j.quaint.2014.05.056
- Dhôte, J., Hatsch, E., Rittié, D., 1997. Profil de la tige et géométrie de l'aubier chez le Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.). *Bull Techn ONF* 33, 59–82.
- Dianin, S., 1995. Les forêts à Besançon au XVIIIème siècle (Master's thesis). Université de Franche-Comté.
- Dufraisse, A., 2006. Charcoal anatomy potential, wood diameter and radial growth. *Bar International Series* 1483, 47.
- Dufraisse, A., 2002. Les habitats littoraux néolithiques des lacs de Châlain 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.
- Dufraisse, A., Coubray, S., Girardclos, O., Dupin, A., Lemoine, M., 2017a. Contribution of tyloses quantification in earlywood oak vessels to archaeological charcoal analyses: Estimation of a minimum age and influences of physiological and environmental factors. *Quaternary International* 1–8. doi:10.1016/j.quaint.2017.03.070
- Dufraisse, A., Coubray, S., Girardclos, O., Nocus, N., Lemoine, M., Dupouey, J.-L., Marguerie, D., 2017b. Anthraco-typology as a key approach to past firewood exploitation and woodland management reconstructions. Dendrological reference dataset modelling with dendro anthracological tools. *Quaternary International*.
- Dufraisse, A., Garcia Martinez, M.S., 2011. Measuring firewood diameters from charcoal analysis . Dendrometrical tools and data interpretation Outils dendrométriques et interprétation des données. *Anthropobotanica* 2, 18.
- Duhamel de Monceau, H.L., 1774. Description des arts et métiers, faits ou approuvés par Messieurs de l'Académie royale des Sciences. Art du charbonnier, Desaint et. ed. Paris.
- Duhamel du Monceau, H.L., 1774. L'art du charbonnier, in: Description Des Arts et Métiers, Tome 2. Imprimerie de la Société typographique, Neuchâtel, pp. 645–707.
- Dupin, A., Girardclos, O., Fruchart, C., Laplaige, C., Nuninger, L., Dufraisse, A., Gauthier, E., 2017. Anthracology of charcoal kilns in the forest of Chailluz (France) as a tool to understand Franche-Comte forestry from the mid-15th to the early 20th century AD. *Quaternary International* 458, 200–213. doi:10.1016/j.quaint.2017.03.008
- Fohlen, C., 1982. Histoire de Besançon. Tome 2. De la conquête française à nos jours. Cêtre, Besançon.
- Fromm, J., Sautter, I., Matthies, D., Kremer, J., 2001. Xylem water content and wood density in spruce and oak trees detected by high-resolution computed tomography. *Plant Physiology* 127, 416–425.
- Fruchart, C., 2014. Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours. (PhD thesis). Université de Franche-Comté.
- Garcia Martinez, M.S., Dufraisse, A., 2012. Correction factors on Archaeological wood diameter estimation. *Wood and Charcoal Evidence for human and natural history SAGVNTVM EXTRA-13* 283–290.
- Girardclos, O., Dufraisse, A., Dupouey, J.L., Coubray, S., Ruelle, J., Rathgeber, C.B.K., 2017. Improving identification of coppiced and seeded trees in past woodland management by comparing growth and wood anatomy of living sessile oaks (*Quercus petraea*). *Quaternary International* 1–13. doi:10.1016/j.quaint.2017.04.015
- Granier, A., Anfodillo, T., Sabatti, M., Cochard, H., 1994. Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. *Tree Physiology* 14, 1383–

- 1396.
- Haneca, K., Boeren, I., Van Acker, J., Beeckman, H., 2006. Dendrochronology in suboptimal conditions: tree rings from medieval oak from Flanders (Belgium) as dating tools and archives of past forest management. *Vegetation History and Archaeobotany* 15, 137–144.
- Haneca, K., Katarina Cufar, Beeckman, H., 2009. Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36, 1–11. doi:10.1016/j.jas.2008.07.005
- Hardy, B., Dufey, J., 2012. Estimation des besoins en charbon de bois et en superficie forestière pour la sidérurgie wallonne préindustrielle (1750-1830). Première partie: Les besoins en charbon de bois. *Révolution forestière française* 4.
- Hillis, W., 1987. Heartwood and tree exudates. Springer Verlag, Berlin. doi:10.1007/978-3-642-72534-0
- Izard, V., 1992. L'art du charbonnier: contributions ethno-botanique et géographico-historique à l'étude des paysages métallurgiques d'après l'anthracanalyse des charbonnières. *Bulletin de la Société Botanique de France Actualités Botaniques* 139, 587–596. doi:10.1080/01811789.1992.10827131
- Jacob, J.-P., Mangin, M., 1990. De la mine à la forge en Franche-Comté: des origines au XIXe siècle., Les Belles. ed. *Annales littéraires de l'Université de Besançon*, Besançon.
- Kim, N.H., Hanna, R.B., 2006. Morphological characteristics of *Quercus variabilis* charcoal prepared at different temperatures. *Wood Science and Technology* 40, 392–401. doi:10.1007/s00226-005-0062-5
- Lacroix, J.-P., 2006. Bois de tonnellerie : de la forêt à la vigne et au vin., Editions d. ed. Paris.
- Lambert, G., 1996. Recherche de signaux anthropiques dans les séries dendrochronologiques du Moyen Age. Exemple des séquences de Charavines-Colletière, in: *Actes Du Ve Congrès International d'Archéologie Médiévale (Grenoble, 6-9 Octobre 1993)*. Société d'Archéologie Médiévale, pp. 143–152.
- Lassus, F., 1968. Les établissements métallurgiques en Franche-Comté aux XVIIe et XIXe siècles (PhD thesis). University of Franche-Comté.
- Malepeyre, A.F., 1836. *Maison rustique du XIXe siècle: encyclopédie d'agriculture pratique*. Tome quatrième. Agriculture forestière, législation et administration rurale., Au Bureau. ed. Paris.
- Marguerie, D., 1991. Evolution de la végétation sous l'impact anthropique en Armorique du Mésoolithique au Moyen Age: études palynologiques et anthracologiques des sites archéologiques et des tourbières associées (PhD thesis). Rennes 1.
- Marié de L'Isle, E.-B., 1835. *Manuel complet des marchands de bois et de charbons, ou Traité de ce commerce en général*. La librairie encyclopédique de Roret, Paris.
- McGuinness, E.A., Kandeel, S.A., Sxopa, P.S., 1971. Wood and fiber. *Journal of the society of wood science and technology* 3, 77–83.
- Morin, D., 1993. Les systèmes d'exploitation du minerai de fer sédimentaire en Franche-Comté (XVI^e-XIX^e siècles) : Archéologie, Typologie et Dynamique des systèmes (PhD thesis). University of Franche-Comté.
- Munaut, A., 1988. Les cernes de croissance des arbres., in: Genicot (Ed.), *Typologie Des Sources Du Moyen-Age Occidental*. pp. 5–51.
- Nelle, O., 2002. Charcoal burning remains and forest stand structure-Examples from the Black Forest (south-west Germany) and the Bavarian Forest (south-east Germany). *BAR International Series* 1063, 201–208.
- Ostermann, R., 2002. Taillis et vignoble dans les collines sous-vosgiennes : leurs liens jusqu'à la fin du XIXe siècle., in: Corvol, A. (Ed.), *Forêt et Vigne, Bois et Vin. XVIe-XXe Siècle*. l'Harmattan, Paris, pp. 89–104.

- Paradis Sandrine, 2007. Etude dendro-anthracologique: une approche méthodologique pour l'étude du calibre des bois: application sur des charbonnières médiévales du Mont Lozère (France, 48).
- Perles, C., 1977. Préhistoire Du Feu, Masson. ed.
- Pierre, F., Gaxatte, J.-P., 2011. Les dessins des mines d'argent de la Croix.
- Schläpfer, P., 1948. Über die Struktur der Holzkohlen.
- Schweingruber, F.H., 1978. Microscopic wood anatomy. Swiss Federal Institute of Forestry Research.
- Tyree, M., Zimmermann, M., 2002. Xylem structure and the ascent of sap. Springer Verlag, Berlin.
- Vion-Delphin, F., 2002. La forêt et la vigne en Franche-Comté : adaptation, variété et tensions au XVIIIe siècle., in: Corvol, A. (Ed.), Forêt et Vignes, Bois et Vin. XVIe-XXe Siècle. l'Harmattan, Paris, pp. 123–134.
- Vion-Delphin, F., 1991. l'approvisionnement en bois de chauffage d'une capitale provinciale au XVIIIe siècle: le cas de Besançon, in: Le Bois et La Ville Du Moyen-Âge Au XXe Siècle. Colloque de Saint-Cloud 18-19 Novembre 1988. pp. 51–74.


Chapitre 5

De la caractérisation du profil de sol des plateformes de charbonnage de la forêt de Chailluz, à la productivité de la pratique

Ce chapitre fait l'objet d'un article publié dans the Journal of Archaeological Science.


Journal of Archaeological Science 107 (2019) 87–99

Contents lists available at [ScienceDirect](#)




Journal of Archaeological Science

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jas



The taphonomic characterization of a charcoal production platform.
Contribution of an innovative pair of methods: Raman analysis and
micromorphology



Aurore Dupin^{a,b,*}, Dominique Sordoillet^{b,c}, Kévin Fréville^b, Olivier Girardclos^b, Emilie Gauthier^b

^a USR 3124, MSHE C.N. Ledoux, 1 rue Charles Nodier, 25030, Besançon cedex, France
^b UMR 6249, Laboratoire Chrono-environnement, 16 route de Gray, 25030, Besançon cedex, France
^c INRAP, 9 rue Lavoisier, 25000, Besançon, France

Abstract/ Résumé

During the Industrial Revolution and until the 19th century, the fuel used in metallurgy was charcoal. The frequent charcoal-making places identified in European archaeological sites are one of the only direct markers of this activity. Understanding the soil stratigraphy of these locations enables us to characterize the intensity of charcoal production and especially to grasp an insight into the forest management of the studied site during charcoal making. Two types of soil profiles have been observed in Europe. The first presents one or several sterile horizons identifiable with the naked eye, separating charcoal levels. The second, which is the most commonly observed type at European archaeological sites, is characterized by a single charcoal level of variable thickness. For the present study, located in eastern France (Franche-Comté), we propose to characterize the soil profile of a charcoal platform, which looks like the second type observed at the European scale, through the application of an innovative pair of methods: The Raman analysis and micromorphology. The Raman paleothermometer, defined by Deldicque et al. (2016) was adapted to define the temperatures reached in charcoal-making contexts. These measurements agree with the literature and experiments. These temperatures are regularly distributed over the profile, confirming the reuse of the platform. Similarly, the micromorphology of the soil profile reveals clear indicators of reuse, with no evidence of long interruptions in charcoal making.

Durant la révolution industrielle et jusqu'au XIX^{ème} siècle, le combustible utilisé en métallurgie était le charbon de bois. Les nombreuses places à charbon identifiées sur les sites archéologiques européens en est l'un des seuls indices directs. Comprendre la stratigraphie du sol de ces places permettrait alors de caractériser l'intensité de la production de charbon et a fortiori, donner une idée de la gestion forestière du site étudié au moment du charbonnage. Deux types de profils de sol ont pu être observés en Europe. Le premier présente un ou plusieurs horizons stériles identifiables à l'œil nu, séparant des niveaux charbonneux. Le second, le plus observés sur les sites archéologiques européens, est caractérisé par un unique niveau charbonneux d'épaisseur variable. Pour cette étude, localisée dans l'Est de la France (Franche-Comté), nous proposons de caractériser un profil de sol de plateforme de charbonnage ressemblant au deuxième type observé à l'échelle européenne, par l'application d'un couple novateur de méthodes. Le paléothermomètre défini par Deldicque et al (2016) est adapté pour définir les températures atteintes en contexte de charbonnage. Ces mesures sont en adéquation avec la littérature et les expérimentations. Ces températures se répartissent de manière homogène le long du profil, confirmant une réutilisation de la plateforme. Dans la même optique, la micromorphologie du profil de sol révèle des indices sûrs de réutilisation de la plateforme, sans épisode long d'arrêt de la pratique.

1. Introduction

Wood charcoal has a much higher calorific value than wood, and can be used to surpass the temperature of iron fusion (1200°C) (Mangin, 2004; Woronoff, 1990). For this reason it was the primary fuel source used in metallurgy until the 18th century (Bouchey, 1969; Claerr-Roussel, 2000; Crew and Mighall, 2013; Dianin, 1995; Lassus, 1968; Mangin, 2004; Wheeler, 2011; Woronoff, 1990), before being replaced by fossil energies such as coal in the middle of the 19th century for smelting iron ore, and for iron working from the 18th century onwards (Woronoff, 1984). Wood charcoal can also be used for domestic purposes (heating and cooking: Deforce and Haneca, 2015; Namaalwa et al., 2009; Syred et al., 2006). In order to meet these energetic needs, society bestowed a relatively important fuel function on the forest, depending on the availability of resources and the domestic, artisanal and industrial needs of the region (Corvol, 1987). Understanding and characterizing the charcoal production of a region can thus evaluate the fuel function of the forest, and consequently, assess the forest management associated with charcoal production.

Charcoal platforms are relics of charcoal making activities, and have been recorded in France from the Middle Ages and until the 19th or even the 20th centuries (Allée et al., 2010; Bonhôte and Vernet, 1988; Bouchey, 1969; Davasse, 2000; Malepeyre, 1836). In addition, charcoal production was cited and described in the botanic treaty of Theophrastus dating from the 4th century before our era (Amigues, 1993).

Traditionally, the wood pile is erected on a platform previously worked in such a way so that the surface is as homogeneous and flat as possible. After combustion, the charcoal is pulled from the centre towards the exterior of the platform to cool down. The covering material (clay, leaf, burnt soil) mantling the wood pile is recovered for subsequent firing (Duhamel de Monceau, 1774). Charred wood considered to be economically too small for industrial purposes or domestic wood is left on the platform. The reuse of charcoal platforms has been substantiated by different ethnographic sources (Bouchey, 1969; Marié de L'Isle, 1835). This results in a complex soil stratigraphy of platforms as residues are reworked during the different firings. Understanding this stratigraphy could give us access to the information missing from texts, such as the intensity of the practice and periods of reuse. At many European archaeological sites, the reuse of charcoal platforms seems obvious (i.e. Davasse, 2000; Deforce et al., 2013; Dubois et al., 1996; Fabre, 1996; Nelle, 2003; Rouaud, 2013). Two types of platform soil profiles have been observed. The first is characterized by charcoal levels visible with the naked eye, with thicknesses ranging from 8 to 22 cm each, separated by sterile levels between 1 and 10 cm thick (Dubois et al., 1996; Fabre, 1996; Gebhardt, 2007; Hillebrecht, 1982; Nelle, 2003; Rouaud, 2013) (Table 5.1). The authors interpret this first type as being linked to an occasional use of the platform, with distinctive periods of reuse separated by periods with no charcoal making. However, the radiocarbon dates carried out on the charcoal levels from two platforms in Nouvelle-Aquitaine (southwest France) do not enable us to confirm the existence of distinctive periods (Rouaud, 2013). The anthracological spectrums of the charcoal levels providing an image of forest dynamics are different in most cases, indicating a modification of the forest cover in the long term. But at certain sites, the spectrums seem to be identical, indicating a relative stability in the composition of populations over time (Table 5.1). The second type of charcoal platform soil profile is the most frequently observed at archaeological sites. It has no charcoal levels identifiable with the naked eye, but rather a homogeneous stratigraphy over a thickness of 5 to 30 cm (Carrari, 2015; Deforce et al., 2013; Knapp et al., 2013; Ludemann, 2010; Ludemann et al., 2017; Nelle, 2003; Paradis-Grenouillet, 2012; Pescini et al., 2017; Rouaud, 2013), which even

reaches 80 cm in some Pyrenean sites (Izard, 1992). The interpretation of this type of profile remains rather limited, on account of the homogeneity of the charcoal horizon.

For this reason, we propose here to characterize a soil profile of a charcoal platform in the forest of Chailluz in Franche-Comté, in the east of France, which looks like this second type of platform observed at the European scale. More precisely, this study aims to characterize variations in the intensity of charcoal making, and therefore to give us an idea of the demand for wood charcoal. Indeed, as the intensity and the demand for charcoal are proportionally linked, high demand should logically result in an increase in the proportion, or in any case of the intensity, of the surfaces exploited for charcoal production (Actu Environnement, 2012).

The reuse of platforms and the intensity of the practice will be characterized by a micromorphological study and by a Raman spectroscopic study of the soil of the studied charcoal platform.

Publication	description	thickness of the charcoal-rich layers	thickness of the sterile layers	radiocarbon dating		anthracological spectra	interpretation
				site and location in the soil profile	date AD		
Dubois, 1996	two charcoal-rich layers separated by colluvium	10 cm				similar	no sustainable implantation of the activity. No systematic reuse
Nelle, 2003	two charcoal-rich layers separated by a layer without charcoal	22 cm / 8 cm / 15 cm	5-10 cm	site 8 : Deepest layer	1329-1440	similar	identifiable charcoal-rich layers, with different periods
	three charcoal-rich layers separated by a layer without charcoal			site 9 : Deepest layer	1410-1617		
Rouaud, 2013	two distinct layers related to charcoal production, and separated by a sterile layer	6 cm	4-6 cm	CH17.2 deepest layer	1648-1954	different	Stratigraphy is the only clue permitting to distinguish two periods of use
		12 cm		CH17.2 upper layer	1675-1942		
		8 cm	CH36 deepest layer	1492-1954	similar		
		12 cm	CH36 upper layer	1663-1953			
Gebhardt, 2007	three layers rich in charcoal, separated by thin layers of clay		1-3 cm				
Hillebrecht, 1982	some charcoal-rich layers separated by layers without charcoal					different	
Fabre, 1996	two distinct layers with charcoal					different	

Table 5.1 : Data on the charcoal platforms with several charcoal levels separated by sterile levels.

2. Study area and material

The forest of Chailluz is located north of Besançon, the provincial capital since 1674 (Bépoix, 2010; Fiétier, 1973). Chailluz covers an area of around 1,600 ha to the west of an 80 km² woodland zone. The substrate is a limestone bedrock (mean altitude between 300 and 350 m a.s.l.) with a mountainous fold in its northern part which defines the boundary of the territory of Besançon (Fruchart, 2014). The karst terrain is dotted with almost 500 dolines (sinkholes) and has polygenic soils, mostly mesotrophic brunisol (Gaiffe and Bruckert, 1985). Almost a thousand charcoal making platforms have been identified in the forest of Chailluz, via LiDAR prospection (high-resolution altimetric data obtained with an aerial laser sensor: Baltsavias, 1999; Wehr and Lohr, 1998), and were studied in an archaeological and environmental context (Fruchart, 2014; Fruchart et al., 2014; Laplaige, 2012; Nuninger et al., 2015, 2010; Opitz et al., 2015). 39 charcoal platforms were dated with the radiocarbon method, showing that charcoal production was practiced from the 17th to the 20th centuries (Dupin et al., 2017; Fruchart, 2014). All these platforms present an apparent homogeneous stratigraphy, like it was observable on the second type profile described in introduction. The present study is based on one of these platforms. More precisely, it is based on the dated platform CH29 (bottom of the charcoal rich-profile: 160±30 years cal.BP), which is located on the forest slope (**figure 5.1**), with a permanent retaining wall for levelling the ground. This type of structure is mainly found in the mountains, where slopes are steep, such as in the Pyrenees (Izard, 1992). In view of the work carried out to set up this retaining wall, this type of platform is the most likely type to have been reused. However, these age data are not sufficient to prove the reuse of the platform because the ages of the upper and lower parts of the charcoal-rich profiles were not significantly different. The soil profile of this platform is characterized by a homogeneous charcoal level over a thickness of nearly 20 cm, capping a much paler-coloured level about fifteen centimetres thick, and lying on limestone stones. 13 other platforms were cored in this forest, revealing charcoal levels up to 38 cm thick. The anthracological spectrums, dominated by *carpinus* and *fagus*, associated with *quercus*, of the base and the uppermost charcoal level of platform CH29 are similar (Dupin et al., 2017). The stability of the taxonomic composition of forest settlement over time can explain this result, as can the reworking of the soil and charcoal residues.

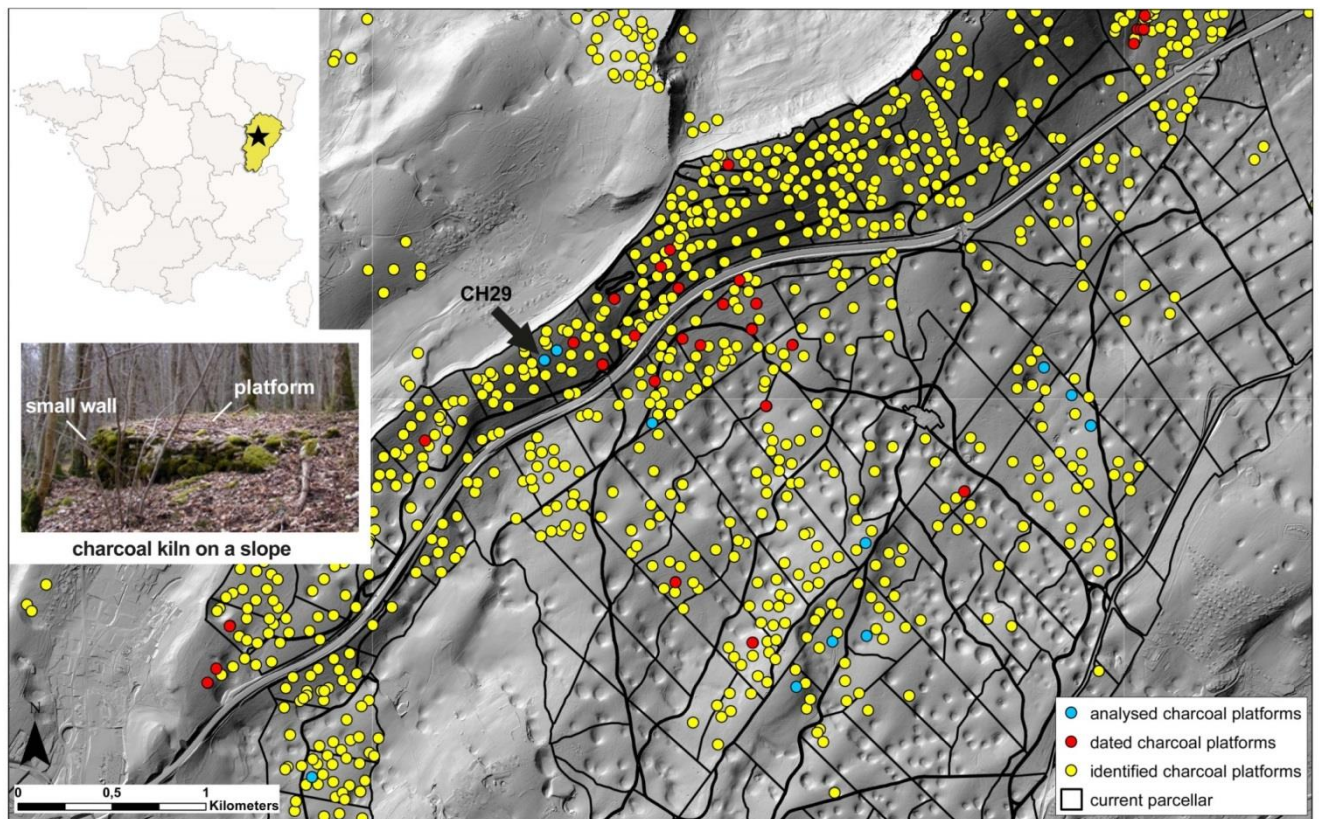


Figure 5.1 : The forest of Chailluz on a LiDAR projection (Data: C. Fruchart, 2014). The charcoal platforms that underwent an anthracological analysis (blue dots) were also radiocarbon dated. The active reserve stand from 1721 to 1893 is represented in red.

3. Methods

3.1 Micromorphological study of the profile of soil B of platform CH29

The microstructure of a soil can be characterized by the microscopic observation (Frei, 1950; Graçanin, 1950; Nikiforoff, 1941) of the different soil fabrics in terms of the organization, size and shape of the primary particles, the voids and the aggregates making up the soil (Altemüller, 1962; Bullock et al., 1985; Kubiens, 1938). The micromorphological approach is often used in archaeological contexts as it enables us to identify the soil characteristics linked to a particular process, whether it is anthropic or not (Bullock et al., 1985; Courty et al., 1989).

The soil formed during the hypothetical succession of charcoal making episodes is a complex case, and to our knowledge, the microstructure has only been studied by Gebhardt (2007) on charcoal platforms in Belgian forests, in Alsace and in Brittany (France).

The systematic preparation and working of the soil before the edification of the charcoal kiln consists in levelling the platform to even out the land, and recovering the clay for subsequent kilns. Identifying these practices with micromorphological analysis can confirm the reuse of platforms.

Here, the micromorphological analysis was carried out on three thin sections from the profile of soil B of platform CH29 (Figure 5.2A). This soil profile was chosen based on surface magnetic susceptibility data presented in the study by Dupin et al. (2017), showing

carbonization in this place, and near the probable location of the chimney (PR.B in **figure 5.3**).

Resin impregnation of the sediments was carried out by the Thomas Beckmann laboratory (Schwülper-Lagesbüttel, Germany) using standard procedures. A petrographic Leica DMLM microscope with a Leica DFC 320 camera was used for the micromorphological study. The micromorphological terminology used are those cited in **Jongerius and Rutherford (1979)** and **Bullock et al. (1985)**. We described distribution of particles (**Stoops and Jongerius, 1975**), basic components, shape and roundness (**Brewer, 1964; Karale et al., 1974; Pettijohn, 1957**), microstructure (**Brewer, 1964; Hodgson, 1974; Kohl, 1971; United States Department of Agriculture, 1951**) and porosity (**Beckmann and Geyger, 1967; Brewer, 1964**). The abundance of the components was estimated visually by comparing them with a reference chart and given as percentages (**Bullock et al., 1985**). Woody charcoals were identified thanks to four discriminating criteria which are the strong reflection of charcoals in reflected light, their intense dark black color, their cellulosic structure preserved after carbonization, and the sharp limit of their structure (**Clark, 1988a, 1988b**). Woody charcoals were classified as microcharcoal when they were inferior to 20 μ m and as macrocharcoal when they were superior to this size. In order to avoid the operator effect we defined the colours of the soil inspired by the Munsell code (**Munsell, 2000**) directly on thin sections under natural light (PPL), with the same magnification ($\times 125$).

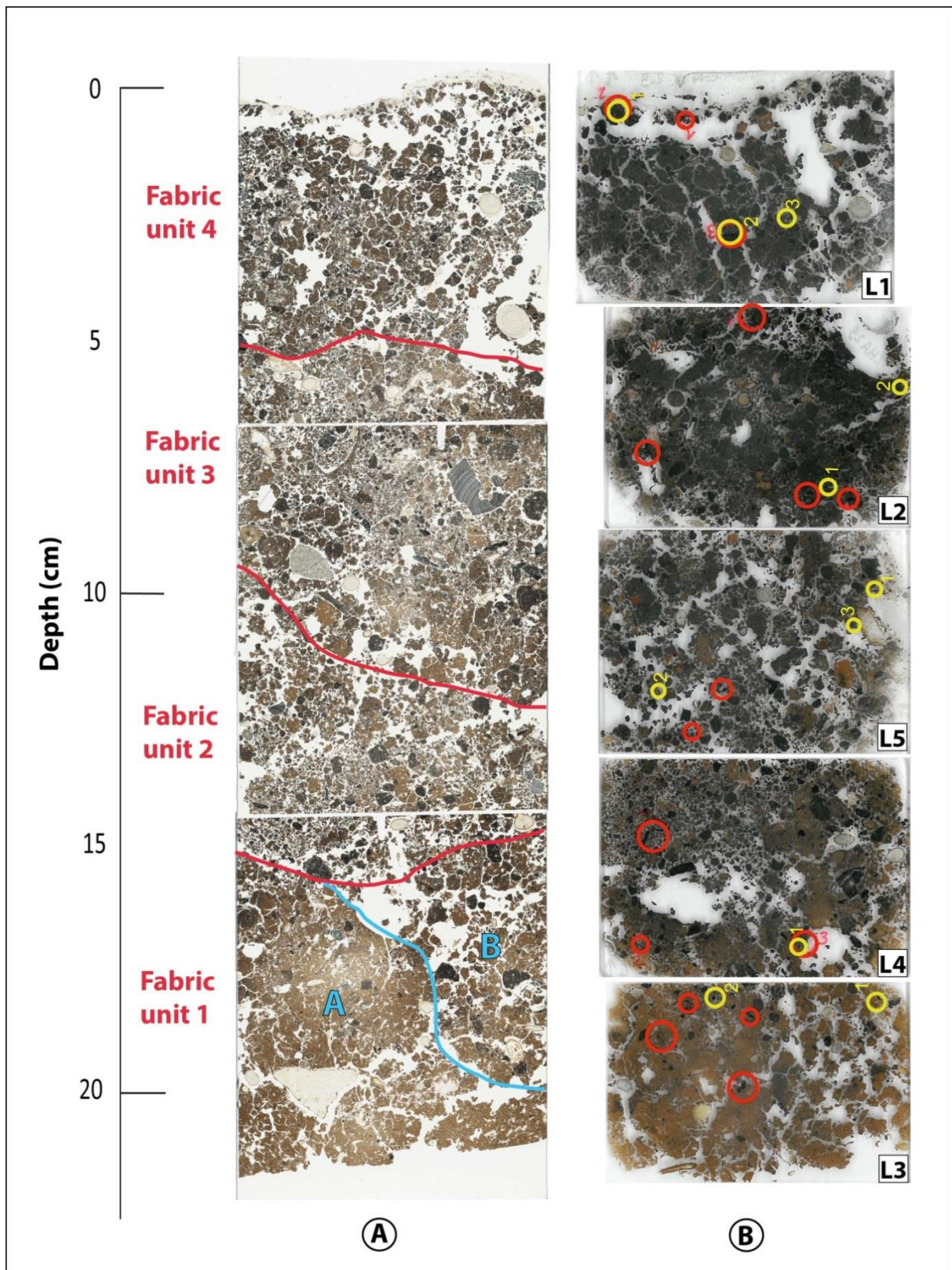


Figure 5.2 : Profile of soil B of the CH29 charcoal platform.

A: Micromorphological thin sections. The 4 fabric units interpreted by this analysis are represented here by the limits in red. Complexes A and B of fabric unit 1 are separated here by the blue limit.

B: Raman thin sections noted from L1 to L5. Red circles delimit the measurement areas of the Raman analysis. Yellow circles locate the site of the fusinites and semi-fusinites for which reflectance was qualitatively evaluated.

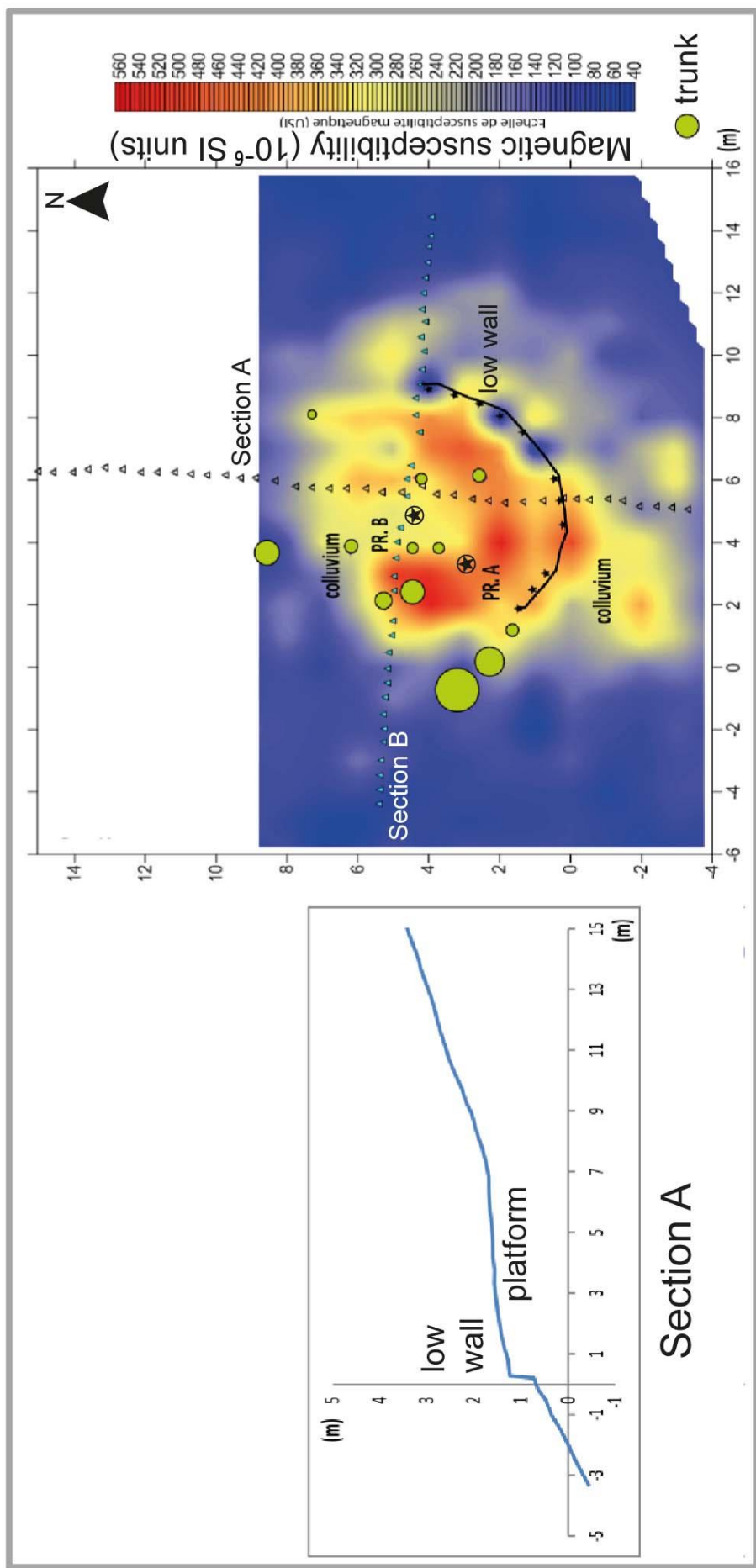


Figure 5.3 : Magnetic susceptibility of the surface of CH29 (after Dupin et al., 2017). PR.B is the site of the profile of soil B that underwent the micromorphological and Raman study.

3.2 Raman analysis of the profile of soil B of the CH29 platform

The RSCM method (Raman spectroscopy of carbonaceous material) is increasingly used in archaeological contexts as it is non-destructive and provides access to the provenance of materials, the stage of preservation or the production technology (Clark, 2007; Clark et al., 2007; González-Rodríguez et al., 2011; Smith and Clark, 2004). However, to our knowledge, Raman analysis has never been applied to traditional charcoal contexts.

The RSCM method is based on the quantification of the degree of organization of the carbonaceous material (CM), which is identified by two characteristic spectral bands with wave lengths between 1100 and 1800 cm^{-1} and between 2500 and 3100 cm^{-1} (Beysac et al., 2002). Deldicque et al., (2016) correlated the degree of carbonization of the CM with the temperatures attained by Raman spectrum analysis. In very controlled experimental conditions, they defined two paleothermometers reflecting the degree of carbonization of the CM established according to the residence time at HTT (highest temperature of treatment), statistically valid between 600 and 1200 $^{\circ}\text{C}$. The first paleothermometer was defined for a residence time at HTT of 1h and the second for a HTT of 6h and more.

In the case of charcoal platforms, this analysis can reproduce the maximal temperatures attained during the different pyrolyses. In this way, interpreting the stratigraphic meaning of the distribution of the temperatures in the profile of soil B of platform CH29 may provide part of the answer for the reuse of this platform.

For charcoal making, we consider a residence time at HTT of more than 6h if we refer to the temperatures recorded during the course of carbonization in experimental kilns (Paradis-Grenouillet, 2012). The paleothermometer retained for the present study thus follows the following equation for a HTT of more than 6h (Deldicque et al., 2016):

$$17173.76x^4 - 12070.17x^3 - 25628.07x^2 + 30429.69x - 7984.018$$

with $x = H_D/H_G$ (H = peak intensity), with a R^2 coefficient of 0.99

Raman analysis was carried out on five polished and uncovered thin sections (Chrono-Environment Laboratory, UMR 6249) from the profile of soil B of platform CH29 (**Figure 5.2B**). An optical microscope with a micro-Raman system, LabRam HR800UV from the Jobin Yvon company with green laser (532 nm, Nd-YAG laser) was used (LOG Laboratory of ocean and geosciences, UMR 8117). Three iterations per analysis were carried out with an acquisition duration of 30 seconds. One to three analyses were conducted by measurement areas of several mm^2 , spread throughout the stratigraphy (red dots in **figure 5.2B**). The laser wavelength used is different to that used for the elaboration of the paleothermometers by Deldicque et al. (2016), which is 514.5 nm. But this difference in wavelength does not seem to generate any substantial difference in the R1 ratio measuring the surface ratio between band D1 and band G (Aoya et al., 2010; Delarue et al., 2016). The polishing required for making the soil sections can modify the CM and therefore the spectrums (Aoya et al., 2010; Beysac et al., 2003; Mostefaoui et al., 2000), in the same way as the fluorescence due to the resin (Beysac et al., 2002). However, only the spectrums presenting very little or no fluorescence allowing for the correction of the spectrums with the peakfit v.4 software were treated for this study, and the measurements were taken from grains in the thin section to avoid the polishing effect.

The fusinites and semifusinites are macerals of charcoal formed by wildfire activity, by carbonization and rapid alteration where oxygen plays a more important role than for vitrinite (Bell and Murchinson, 1964; Murchison, 1964; Scott, 1989; Scott and Glasspool, 2007; Speight, 1994). In this way, the reflectance of fusinites and semifusinites was qualitatively identified on five thin sections prepared for the Raman analysis with a reflected light microscope (yellow dots in **figure 5.2B**).

4. Results

4.1 Micromorphological results

The detailed micromorphological description of the three soil thin sections is presented in **table 5.2**. The most pertinent elements for the interpretation of the three soil thin sections are described below, from the base of the profile towards the surface.

This is a decalcified soil. The whole profile contains residual grains of silica, sections of fresh roots and charcoal. Loosely packed subangular blocky aggregates (**figure 5.4D**) are present everywhere apart from in the fabric unit 1A. Such microstructure are known in archaeological context, related to human waste deposits (Courty et al., 1989) or cultivated soils (Bullock et al., 1985).

A first fabric unit (Unit 1 in **figure 5.2A**), is observable over the first 7 centimetres, characterized by colours ranging from yellowish-red to reddish-brown (Munsell notations 5YR/4/6 and 5YR/4/4), which is paler than the rest of the profile. This unit contains two complexes with different microstructures. The first complex (Unit 1A in **figure 5.2A**) presents a subangular blocky structure with moderately developed aggregates and a lower porosity (15%) than the rest of the profile. This porosity includes voids, channels and biological chambers, indicating earthworm activity. Charring indicators are tenuous. Wood charcoal (10%) is mainly or exclusively made up microcharcoal, and burnt humic-clayey aggregates are sparse (5%). However, a charring front is observable at the top of this unit (**figure 5.4A**). The second complex (Unit 1B in **figure 5.2A**) is characterized by a crumb to granular structure (**figure 5.4B**), and consequently by a porosity more than two and a half times higher than in the first complex. Charring indicators are also twice as frequent as in complex A (30-35% compared to 15% in complex A).

The second fabric unit (extending over 5 cm) is dark reddish-brown (Munsell notation 5YR/3/3), with a granular to crumb structure, high porosity (60%). Charring indicators are more abundant in the lower unit (85-90%) and some siliceous fragments are slightly rubefied (**figure 5.4E**). In addition, some burnt aggregates present several intensities of rubefaction, identifiable by colour differences from the core towards the exterior of the aggregate (**figure 5.4C**). Aggregates with different intensities of rubefaction are observable side by side (**figure 5.4D**). Generally speaking, this unit present loosely packed subangular blocky aggregates (**figure 5.4F**) with different size, color and shape. The presence of fresh roots, earthworm castings and biological channels intersecting some burnt aggregates indicates biological activity after charring.

The third fabric unit (over 7 cm) has a very dark brown (Munsell notation 7.5YR/2.5/3) complex structure. Porosity is lower than in the previous unit (40%), but biological activity is higher. Many fresh roots, biological chambers and channels and several loosely packed subangular to sub-rounded biological type aggregates run through this unit,

intersecting burnt aggregates. The presence of aggregates with different intensities of rubefaction is still significant, and the wood charcoal is more abundant here than in the rest of the profile (30-35%).

The fourth and last fabric unit (5 cm) presents a very dark brown (Munsell notation 7.5YR/2.5/2) complex to granular structure, clearly very affected by biological activity and by compaction due to its location at the surface of the profile (**figure 5.4G**). Fresh roots are plentiful and the porosity is mainly represented by biological voids. However, indicators of charring remain very present (90%). Moreover, there are more burnt aggregates in this part (70%) than in the rest of the profile.

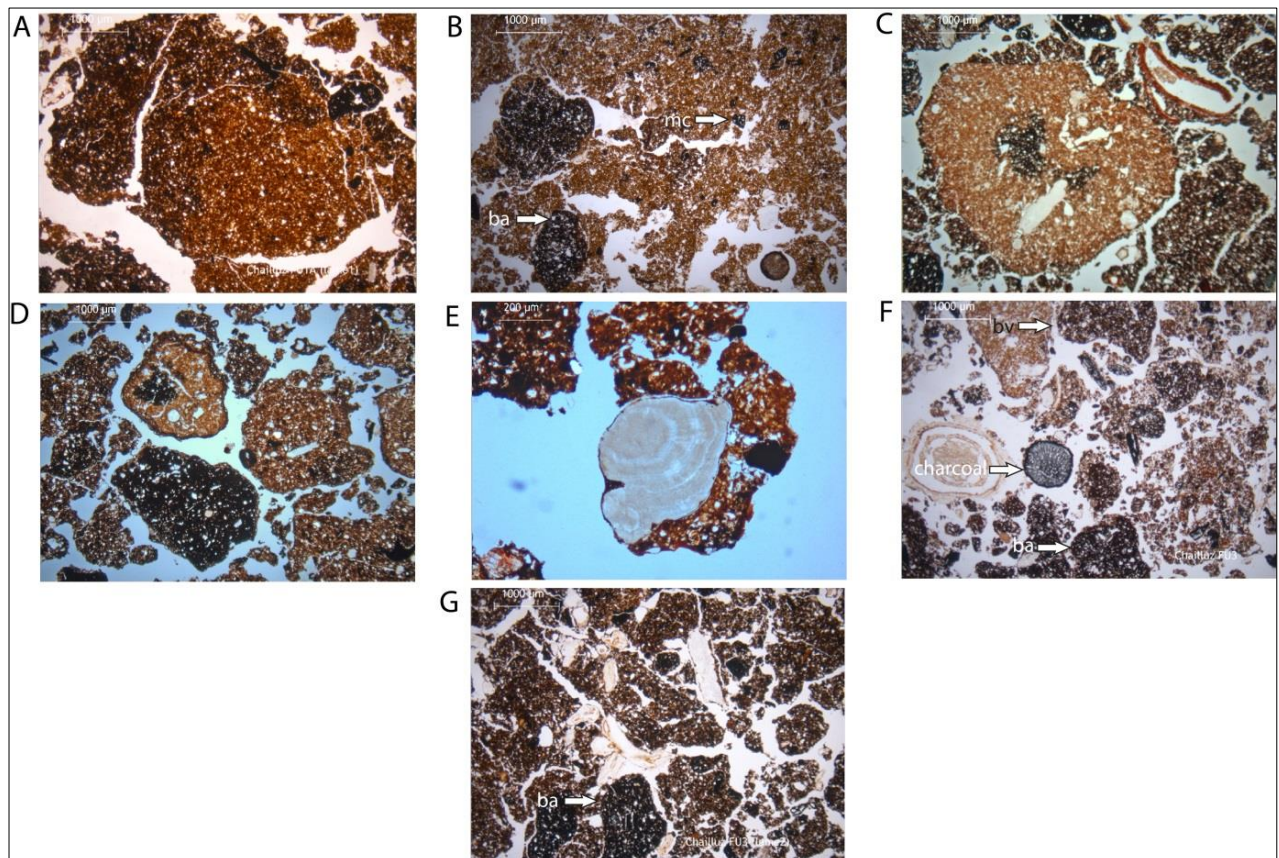


Figure 5.4 : Elements observed under the microscope in the micromorphological thin sections. bv: biological voids / mc: microcharcoal / ba: burnt aggregates / A: Charring front in the fabric unit 1A / B: Structure of fabric unit 1B / C: Clay aggregate with several levels of rubefaction / D: Clay aggregates side by side with several different levels of rubefaction / E: More or less reddened radial chert / F: Structure of fabric unit 2 / G: Structure of fabric unit 4

4.2 Raman results

All of the spectrums obtained (**Figure 5.5**) present similar profiles on the wavelength range 1100-1800 cm^{-1} , with bands of defects, noted from D1 to D5 and attributed to the disorder of fused benzene rings with than six rings. The G mode at 1600 cm^{-1} is attributed to the C=C stretching vibration of sp² carbon ‘graphite-like’ clusters (**Francioso et al., 2011; Williams, 1995**). The D1 band at 1360 cm^{-1} represents the scale of the polyaromatic layers (**Deldicque et al., 2016**). Band D2 is a shoulder of band G. It is not very marked here, which reflects the charring process. Band D3 is identifiable at 1520 cm^{-1} , band D4 at 1280 cm^{-1} , and band D5 at 1450 cm^{-1} . Band D5 is attributed to the capture of hydrocarbures in organic matter nanoporosity. It is only slightly visible here, and does not show any thermal degradation by laser (**Deldicque et al., 2016**).

All of the estimated temperatures (Detail: **Table 5.3**) for a residence time of 6 hours at HTT are represented in **figure 5.6**. The estimated temperature of the second analysis of the measurement area R1 of the thin section L1 was not retained for calculating the median temperature of the area R1. This is because its Raman spectrum is highly influenced by fluorescence, which is difficult to correct with the peakfit software. All of the temperatures range from 696 to 1002^{°C} with an accuracy of more or less 20^{°C}. The differences in temperature were calculated for each measurement area, as well as between the medians calculated for each measurement area. Regarding the distributions of these differences, there is no significant difference in temperature between close measurement points, in a same measurement area, and between the measurement areas on the whole profile (Kolmogorov-Smirnov test, with a p-value of 0.978). Therefore, the temperatures are not significantly different according to their stratigraphic position in the profile.

Based on all the thin sections, fusinites are well represented (**Figure 5.7D**) in comparison with semi-fusinites. Some of them present clearly visible cellular structures (**Figure 5.7B and C**). Many fusinites close to each other present different reflectances (**Figure 5.7A**). Non-carbonized plant debris are also well represented (**Figure 5.7E**).

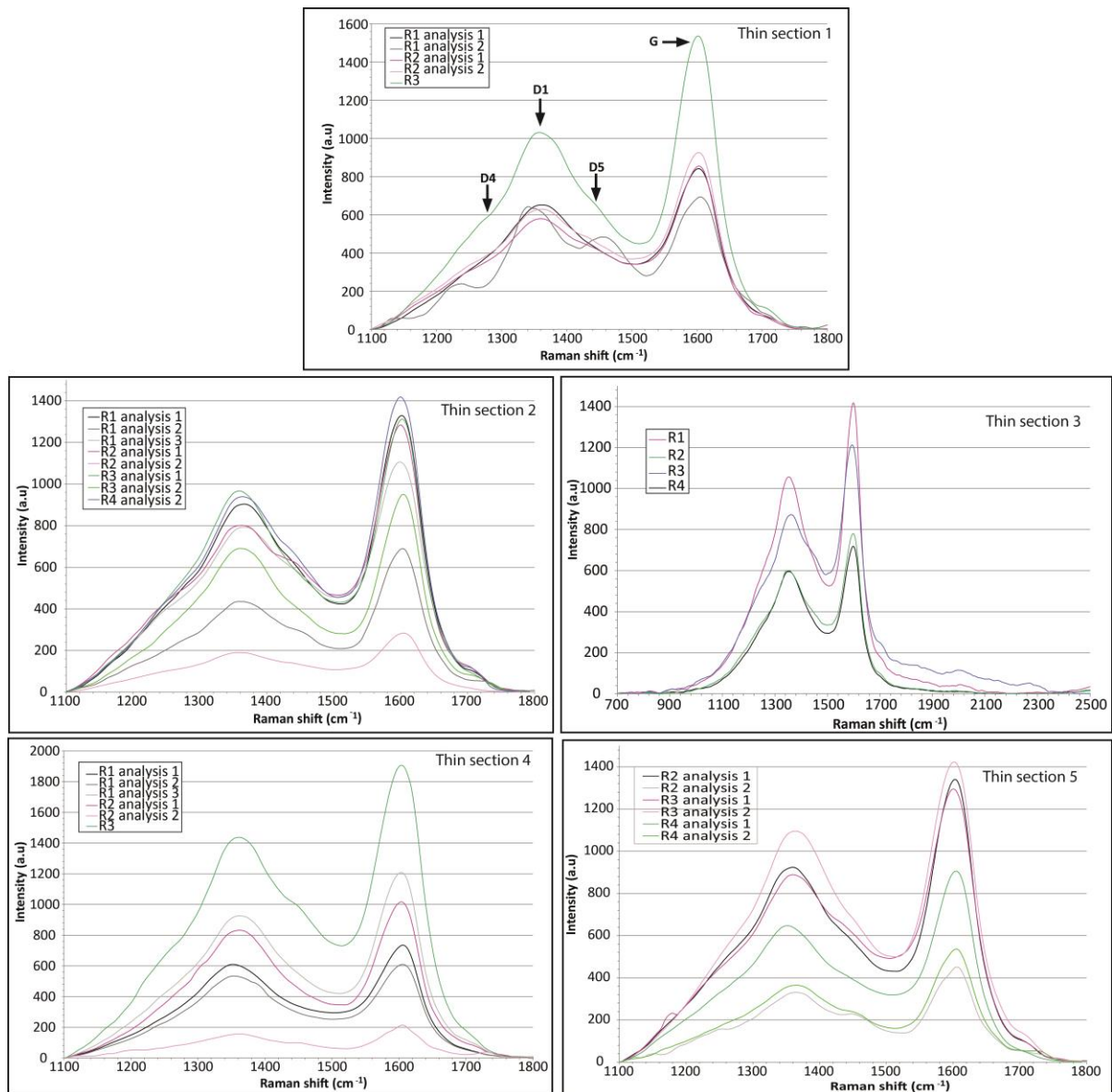


Figure 5.5 : All of the Raman spectrums obtained by thin section. Nomenclature: thin section 1 R1 analysis 1 = First analysis in the first measurement area of thin section L1. In order to enhance readability, the Raman spectrums by measurement area were represented in the same colour gradient.

Table 5.3 : Table representing the estimated temperatures according to the paleothermometer at $H_{TT} \geq 6h$, after Deldicque et al., 2016 (“estimated temperature” column).

Thin section	measurement area in the thin section	analysis	H_{D1}	H_G	H_{D1}/H_G	estimated temperature ($^{\circ}C$)	median temperature by area ($^{\circ}C$)
L1	R1	1	651,54	841,42	0,77	782,47	782,5
L1	R1	2	633,24	693,73	0,91	1181,39	
L1	R2	1	579,41	854,68	0,68	733,59	734
L1	R2	2	629,39	925,69	0,68	734,45	
L1	R3	1	1030,79	1535,97	0,67	730,42	730,4
L2	R1	1	903,69	1328,71	0,68	734,54	734,5
L2	R1	2	435,39	689,78	0,63	703,29	
L2	R1	3	792,53	1105,64	0,72	748,61	
L2	R2	1	801,34	1283,91	0,62	696,38	713
L2	R2	2	189,91	283,67	0,67	729,61	
L2	R3	1	967,14	1311,71	0,74	757,38	755
L2	R3	2	690,65	950,43	0,73	752,57	
L2	R4	2	939,39	1418,18	0,66	725,89	725,9
L3	R4	1	598,80	718,43	0,83	874,18	874,2
L3	R1	1	1056,50	1417,35	0,75	761,59	761,6
L3	R2	2	594,24	780,61	0,76	771,71	771,7
L3	R3	3	872,40	1212,46	0,72	749,67	749,7
L4	R1	1	609,85	734,88	0,83	865,94	865,9
L4	R1	2	533,65	609,70	0,88	1002,38	
L4	R1	3	926,14	1207,87	0,77	775,93	
L4	R2	1	831,93	1016,64	0,82	842,33	797,6
L4	R2	2	155,73	214,08	0,73	752,90	
L4	R3		1436,84	1906,11	0,75	766,60	766,6
L5	R2	1	924,01	1340,63	0,69	738,28	746,9
L5	R2	2	330,88	451,17	0,73	755,52	
L5	R3	1	888,92	1295,15	0,69	737,13	742,4
L5	R3	2	646,78	905,77	0,71	747,57	
L5	R4	1	1095,47	1423,18	0,77	778,40	756,5
L5	R4	2	364,70	536,30	0,68	734,50	

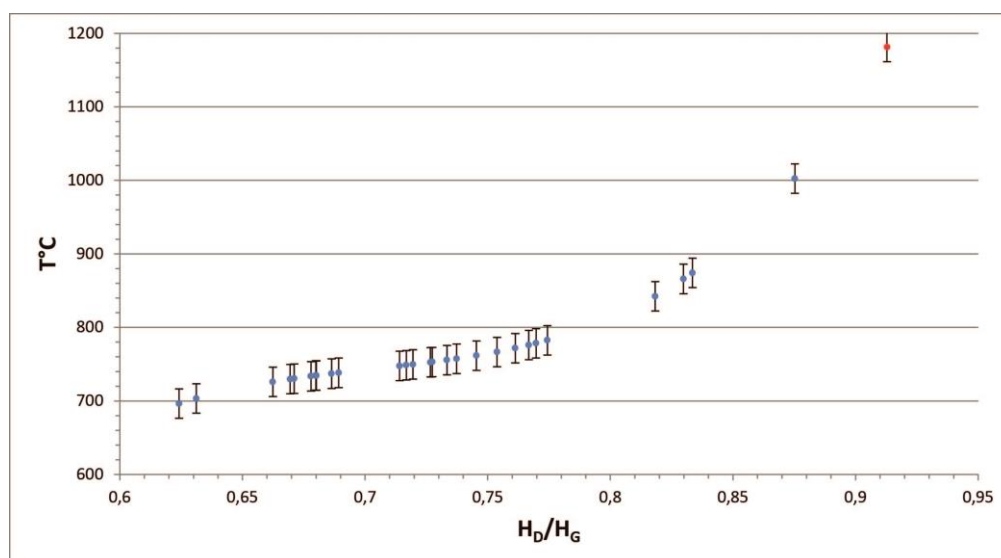


Figure 5.6 : Graphic of the estimated temperatures according to the paleothermometer at HHT from 6h +/- 20°C, calculated by Deldicques et al. 2016. Error bar of 20°C.

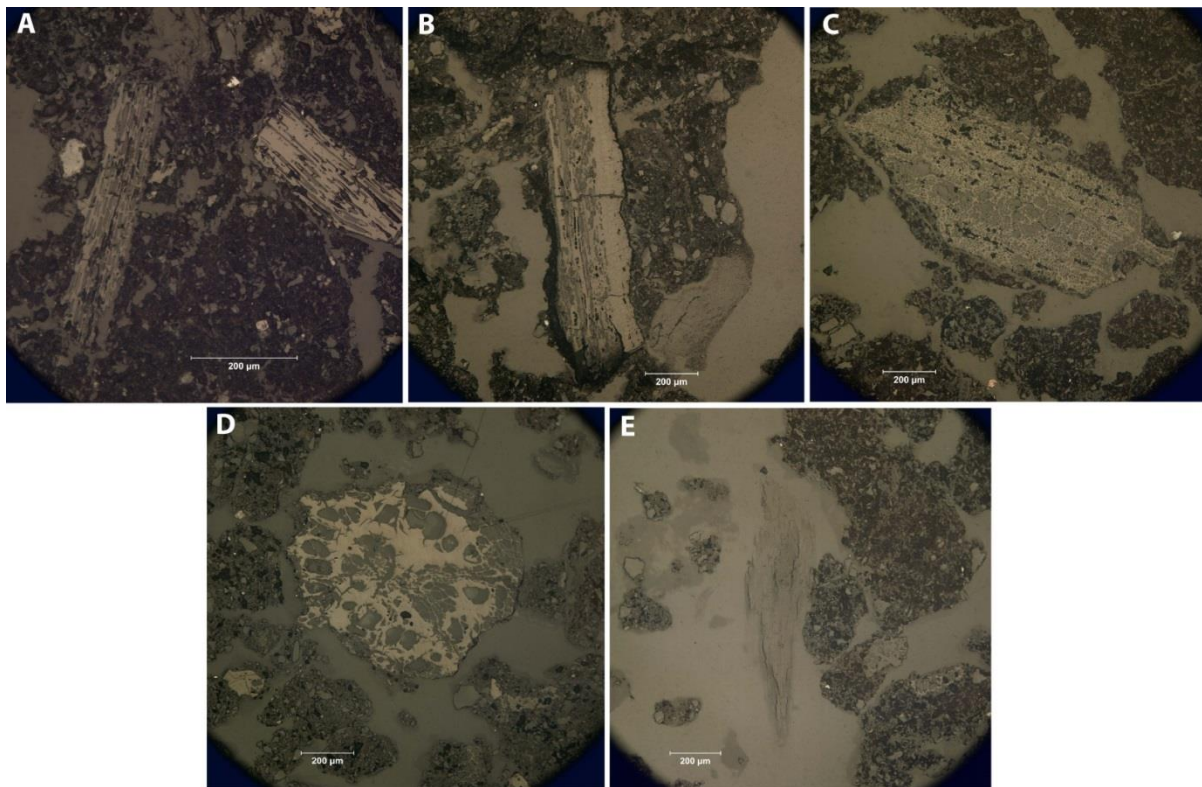


Figure 5.7 : Observation of fusinites with a reflected light microscope. **A**: Two nearby fusinites with different reflectance / **B** and **C**: Fusinites with a clearly visible cellular structure / **D**: More altered fusinite / **E**: Non-charred plant debris

5. Discussion

5.1 Bringing to light charcoal making through the micromorphological study

The micromorphological characteristics of the deepest unit of the studied profile (unit 1A), such as the colour of the soil, limited indicators of charring and low porosity, tend to show that this unit was not modified by charcoal-making itself. The charcoal particles and burnt aggregates may have been moved from the upper units towards unit 1A by biological activity after charcoal making. Indeed, in other pedological conditions, microcharcoal can be displaced by a depth of up to 1 m over 500 years (Carcaillet, 2001). Unit 1A thus represents the non-modified part during the course of charcoal making, where the subsequent reworking of microcharcoal is purely biological. In the units above 1A, the high proportions of elements linked to charcoal making (on average 90%), the colour of the soil, the type of aggregation (subangular blocky peds) and the presence side by side of aggregates with a different intensity of rubefaction points to anthropogenic movement undoubtedly linked to charcoal making. Therefore, the three upper units are characterized by the markers of this practice over a total depth of 17 cm. Unit 4, the most surface unit, presents markers of the resumption of natural functioning, such as biological channels and granules to subangular blocky aggregates. Unit 1B, which presents similar characteristics with the units linked to charcoal making, was probably remobilized either by a burrowing organism or by the resumption of earthworks on the platform during firing after making the platform.

5.2 Estimation of the paleotemperatures reached during the charcoal making

The maximum temperatures attained estimated with Raman spectroscopy range between 700 and 1000°C along the profile, with an average of 757°C, thereby indicating the location of the chimney with the highest temperatures. During experiments, temperatures have been observed to reach 800°C in chimneys, while they are rarely superior to 600°C in the rest of the kiln (Paradis-Grenouillet, 2012). Other indicators confirm that the studied sediments were exposed to this range of temperatures: the magnetic susceptibility on the surface of the platform points to high temperatures above 600°C in this place (Dupin et al., 2017). The position of band G at about 1600 cm⁻¹ on all the Raman spectrums, compared to its theoretical position at about 1580 cm⁻¹, confirms HTTs of around 800°C (Morga, 2011). The presence of fusinites along the whole CH29 soil platform shows that a minimum temperature of 500°C was reached (Jones et al., 1991; Morga, 2011; Scott and Glasspool, 2007; Scott and Jones, 1994). The reddened aggregates, in particular those with different rubefaction intensities, are recurrent in the profile. Yet, Ulery and Graham (1993) demonstrated that clay aggregates tend to redden as a result of the transformation of iron oxides. More precisely, aggregates are yellower and yellower with the intensity of the fire, and become red above 600°C (Ketterings and Bigham, 2000; Mathieu and Stoops, 1972). Gebhardt (2007) observes this change in colour above 400°C.

5.3 Reuse of the CH29 platform

Some indicators show that the different states of use of platform CH29 were reworked, resulting in a homogeneous stratigraphy with no discernible levels of use. The micromorphological study brought to light post-charcoal making biological reworking and movement due to anthropogenic actions. The presence of charcoal elements below the first unit of use (below the charring front observable at the top of the unit 1A) is also an indication of soil reworking. The statistically homogeneous distribution of paleotemperatures along the profile is a clear marker of this reworking. In addition, it seems unlikely that the thick charcoal horizon formed during a single use of the platform. Moreover, the levels of the soil profile with high charcoal concentrations are related to an increase in the intensity of charcoal making (Dupin et al., 2017).

Gebhardt (2007) demonstrated that the soil of a platform used a single time is more compact than that of a platform used several times. In this way, the less compact units of use (2, 3 and 4) compared to the natural unit (unit 1A), also show that platform CH29 was used several times.

Furthermore, some elements that may reveal a reuse of the platform remain tendentious. Indeed, the carbonization conditions within a charcoal kiln are heterogeneous during the firing. For example, the temperatures reached in a kiln, and more specifically in the chimneys, can vary during the course of the same firing (Paradis-Grenouillet, 2012), suggesting HTT recorded in the soil, which may differ from an aggregate to a neighboring aggregate, yet both at the chimney location. The significant HTT measured by Raman analysis therefore confirm the location of the chimney on the CH29 platform, but their insignificant variations over the entire profile do not by themselves confirm the reuse of the platform. In the same way, the presence of aggregates of different colours and fusinites with different reflectances side by side could characterize the reworking of several levels of use,

where each firing had specific charring conditions. Indeed the reflectance of fusinite increases with high temperatures and short durations of heating (Guo and Bustin, 1998). Specifically, reflectance does not only depend on the temperature attained, but also on the duration of heating the material until HTT, the duration at HTT and the initial type of plant (Barker and Pawlewicz, 1986; Guo and Bustin, 1998; Jones et al., 1991). Courty et al. (1989) showed that the colour of clayey minerals tends towards red in an oxidizing context and black in a reducing context. Moreover, in a study of a forest fire, Ketterings and Bigham (2000) demonstrated that the colour of aggregates is also dependent on the duration of exposure to fire. In these conditions, the observation in CH29 of an aggregate with centres tending towards black and tending towards red on the borders could be explained by the reuse of this aggregate by successive firing in different carbonization conditions, or by the different red-ox conditions within the same firing. Verifying whether or not these elements are present in a soil profile of a platform that has been used only once could validate either of these two hypotheses.

French literature from the 19th and 20th centuries, based on the experience and accounts of charcoal makers, confirms the advantages of the reuse of charcoal making platforms. The use of a platform has harmful effects on the soil, which is why it is important to reduce the number of platforms as much as possible (Marié de L'Isle, 1835). From an economic viewpoint, a platform already used in the past allows for better control of pyrolysis and thereby results in a higher yield of the kiln (Battesti, 1992; Bouchey, 1969; Izard, 1992; Perles, 1977). In addition, the charcoal maker used to save 50 francs by reusing a pre-existing platform (Izard, 1992), as he had to spend this sum for the clearing and preparation of a new charcoal place.

5.4 Characterization of the platforms with homogeneous soil profiles

The apparently homogeneous stratigraphy of the profile presents indications of platform reuse over the 17 cm of use (from unit 2 to 4). But no marker of the resumption of the natural function is noted in this section of the stratigraphy. It would mean that the organic matter and the pedo-sediment (i.e. colluvium), enriching the soil from the surface between two uses must have been totally reworked during the systematic preparation of the platform before making each charcoal kiln. Pedo-sediment had undoubtedly contributed significantly to the formation of the soil on the platform located on a slope (Dupin et al., 2017). However, in view of the work realized on the platform for the charcoal production (see description in introduction) it can be assumed that the soil disturbed by the preparation is only about a few centimeters thick. So, the studied platform has been reused over a relatively short time without interruption by long periods with no charcoal making. It would be interesting to verify the presence of indicators of resumption of natural functions in the sterile levels separating the charcoal levels observed in the second type of soil profile (Table 5.1). These markers could thus indicate a sufficiently long period without charcoal making for the soil to become enriched in soil colluvium and organic matter from the surface.

The higher charcoal concentrations (twice as high), at depths of around 10 cm and 20 cm in the profile of CH29, seem to indicate an increase in the intensity of the practice (Dupin et al., 2017). Indeed, the high repeatability of anthropogenic movement during platform preparation can lead to the mixing of exclusively charcoal levels. These levels were almost exclusively made up charcoal residues and burnt soil from previous firings (Dupin et al., 2017). It is thus logical to observe aggregates with different intensities of rubefaction from the centre to the periphery of the particle. Certain historical sources mention a reuse of platforms

up to four or five times per year, every 20 years, to leave time for the coppice to regenerate (Duhamel du Monceau, 1774; Marié de L'Isle, 1835; Perles, 1977). Platforms with homogeneous soil profiles may thus be related to intensive uses in time, with an increase in the intensity of the practice, of up to several times per year, if there are levels with a much higher concentration of charcoal. Furthermore, to confirm this interpretation it would be necessary to verify the presence of the significant clues of the intensity of the charcoal production, highlighted in this study, in other platforms characterised by this type of soil profile.

6. Conclusion

The micromorphological study and the Raman analysis of the CH29 platform enabled us to start the characterization of charcoal making platforms with a homogeneous stratigraphy, observed in most of the sites studied in archaeology.

Many aggregates observed over the whole soil profile present the marks of several carbonization conditions, which could confirm the reuse of the platform. The qualitative analysis of fusinite reflectance corroborates these results, as does the homogeneity of the temperatures along the profile. Raman analysis enabled us to identify the maximum temperatures attained during charcoal making (between 700 and 1000°C near the chimney), thereby validating the use of the paleothermometer defined by Deldicque et al. (2016) in archaeological contexts on charcoal making platforms. All of these markers brought to light the anthropogenic mixing of charcoal residues and burnt soil from previous firings. No interruption in the profile by the resumption of the natural function of the soil is observable, showing the intensive reuse of the platform in time. The high concentrations of charcoal in the CH29 soil profile, which are not visible in the stratigraphy but are identifiable during sieving, may be related to more intensive practices.

Platforms with visible charcoal levels separated by levels of unburnt soil have been related to occasional use. It would thus be interesting to study this type of soil profile in a similar way to that presented here. Such a study would enable us to determine whether the charcoal levels present markers related to intensive reuse, identified in micromorphology and Raman analysis.

References

- Actu Environnement, 2012. Dictionnaire Environnement [WWW Document]. URL https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition.php4 (accessed 4.3.17).
- Allée, P., Paradis, S., Boumédiène, F., Rouaud, R., 2010. L'exploitation médiévale du plomb argentifère sur le mont Lozère. *ArcheoSciences* 177–186.
- Altemüller, H., 1962. Gedanken zum Aufbau des Bodens und seiner begrifflichen Erfassung. *Z Kulturtechn* 3, 323–336.
- Amigues, S., 1993. Recherches sur les plantes de Théophrastes, traduction.
- Aoya, M., Kouketsu, Y., Endo, S., Shimizu, H., Mizukami, T., Nakamura, D., Wallis, S., 2010. Extending the applicability of the Raman carbonaceous-material geothermometer using data from contact metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology* 28, 895–914. doi:10.1111/j.1525-1314.2010.00896.x
- Baltsavias, E.P., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 199–214.
- Barker, C.E., Pawlewicz, M.J., 1986. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in humic organic matter. *Lecture Notes in Earth Sciences* 5.
- Battesti, V., 1992. Une charbonnière expérimentale. university Montpellier II, Montpellier.
- Beckmann, W., Geyger, E., 1967. Entwurf einer Ordnung der natürlichen Hohlraum-, aggregat- und Strukturformen im Boden. *Die Mikromorphometrische Bodenanalyse* 165–188.
- Bell, J.A., Murchinson, D.G., 1964. Biochemical alteration of exinites and the origin of some semi-fusinites. *Fuel* 45, 407–415.
- Bépoix, S., 2010. Une cité et son territoire: Besançon 1391, l'affaire des fourches patibulaires. Presses universitaires de Franche-Comté 71.
- Beysac, O., Goffé, B., Chopin, C., Rouzaud, J.N., 2002. Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: A new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology* 20, 859–871. doi:10.1046/j.1525-1314.2002.00408.x
- Beysac, O., Goffé, B., Petitet, J.P., Froigneux, E., Moreau, M., Rouzaud, J.N., 2003. On the characterization of disordered and heterogeneous carbonaceous materials by Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 59, 2267–2276. doi:10.1016/S1386-1425(03)00070-2
- Bonhôte, J., Vernet, J.-L., 1988. La mémoire des charbonnières. Essai de reconstitution des milieux forestiers dans une vallée marquée par la métallurgie (Aston, Haute-Ariège). *Revue forestière française* 40, 197–212.
- Bouchev, E., 1969. le charbonnier dans les bois. Folklore comtois, Besançon.
- Brewer, R., 1964. *Fabric and mineral Analysis of Soils*. John Wiley & Sons, Ltd., New-York.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., 1985. *Handbook for soil thin section description.*, Waine Rese. ed.
- Carcaillet, C., 2001. Are Holocene wood-charcoal fragments stratified in alpine and subalpine soils? Evidence from the Alps based on AMS 14 C dates. *The Holocene* 11, 231–242. doi:10.1191/095968301674071040
- Carrari, E., 2015. Legacy effects of former charcoal kiln sites on the forest vegetation of a Mediterranean area. università degli studi firenze.
- Claerr-Roussel, C., 2000. Le procédé comtois d'affinage du fer: naissance et mise en place de nouvelles structures de travail au XVIIIe siècle, in: *Minaria Helvetica. La Forge de Montagney - Franche-Comté*. Bulletin de la Société Suisse d'Histoire des Mines, Basel, pp. 105–115.
- Clark, J.S., 1988a. Particle motion and the theory of charcoal analysis: source area, transport,

- deposition, and sampling. *Quaternary Research* 30, 67–80.
- Clark, J.S., 1988b. Stratigraphic charcoal analysis on petrographic thin sections: application to fire history in northwestern Minnesota. *Quaternary Research* 30, 81–91.
- Clark, R.J.H., 2007. Raman microscopy as a structural and analytical tool in the fields of art and archaeology. *Journal of Molecular Structure* 834–836, 74–80.
doi:10.1016/j.molstruc.2007.01.031
- Clark, R.J.H., Wang, Q., Correia, A., 2007. Can the Raman spectrum of anatase in artwork and archaeology be used for dating purposes? Identification by Raman microscopy of anatase in decorative coatings on Neolithic (Yangshao) pottery from Henan, China. *Journal of Archaeological Science* 34, 1787–1793. doi:10.1016/j.jas.2006.12.018
- Corvol, A., 1987. *L'Homme aux bois: Histoire des relations de l'homme et de la forêt, XVIIe-XXe siècle*. Fayard, Paris.
- Courty, M.-A., Goldberg, P., Macphail, R., 1989. *Soils and micromorphology in archaeology*. Cambridge University Press.
- Crew, P., Mighall, T., 2013. The fuel supply and woodland management at a 14th century bloomery in Snowdonia: a multi-disciplinary approach, in: Humphris, J., Rehren, T. (Eds.), *The World of Iron*. London, pp. 473–482.
- Davasse, B., 2000. *Forêts, charbonniers et paysans dans les Pyrénées de l'est du Moyen Age à nos jours: une approche géographique de l'histoire de l'environnement*. Geode, Toulouse.
- Deforce, K., Boeren, I., Adriaenssens, S., Bastiaens, J., De Keersmaeker, L., Haneca, K., Tys, D., Vandekerckhove, K., 2013. Selective woodland exploitation for charcoal production. A detailed analysis of charcoal kiln remains (ca. 1300-1900 AD) from Zoersel (northern Belgium). *Journal of Archaeological Science* 40, 681–689. doi:10.1016/j.jas.2012.07.009
- Deforce, K., Haneca, K., 2015. Tree-ring analysis of archaeological charcoal as a tool to identify past woodland management: The case from a 14th century site from Oudenaarde (Belgium). *Quaternary International* 366, 70–80. doi:10.1016/j.quaint.2014.05.056
- Delarue, F., Rouzaud, J.-N., Derenne, S., Bourbin, M., Westall, F., Kremer, B., Sugitani, K., Deldicque, D., Robert, F., 2016. The Raman-Derived Carbonization Continuum: A Tool to Select the Best Preserved Molecular Structures in Archean Kerogens. *Astrobiology* 16, 407–417. doi:10.1089/ast.2015.1392
- Deldicque, D., Rouzaud, J.N., Velde, B., 2016. A Raman - HRTEM study of the carbonization of wood: A new Raman-based paleothermometer dedicated to archaeometry. *Carbon* 102, 319–329. doi:10.1016/j.carbon.2016.02.042
- Dianin, S., 1995. *Les forêts à Besançon au XVIIIème siècle* (Master's thesis). Université de Franche-Comté.
- Dubois, C., Metailie, J., Izard, V., 1996. Archéologie de la forêt charbonnée: questions et méthodes, illustrées par l'exemple du site de Lercoul (Ariège), in: *XVIIè Rencontres Internationales D'archéologie et D'histoire d'Antibes*. pp. 525–540.
- Duhamel de Monceau, H.L., 1774. *Description des arts et métiers, faits ou approuvés par Messieurs de l'Académie royale des Sciences*. Art du charbonnier, Desaint et. ed. Paris.
- Duhamel du Monceau, H.L., 1774. *L'art du charbonnier*, in: *Description Des Arts et Métiers*, Tome 2. Imprimerie de la Société typographique, Neuchâtel, pp. 645–707.
- Dupin, A., Girardclos, O., Fruchart, C., Laplaige, C., Nuninger, L., Dufraisse, A., Gauthier, E., 2017. Anthracology of charcoal kilns in the forest of Chailluz (France) as a tool to understand Franche-Comte forestry from the mid-15th to the early 20th century AD. *Quaternary International* 458, 200–213. doi:10.1016/j.quaint.2017.03.008
- Fabre, L., 1996. *Le charbonnage historique de la chênaie à Quercus ilex L. (Languedoc, France): conséquences écologiques*. (PhD thesis). Université de Montpellier 2.
- Fiétier, R., 1973. *Recherches sur la banlieue de Besançon au Moyen Âge*. Les belles lettres,

- Paris.
- Francioso, O., Sanchez-Cortes, S., Bonora, S., Roldán, M.L., Certini, G., 2011. Structural characterization of charcoal size-fractions from a burnt *Pinus pinea* forest by FT-IR, Raman and surface-enhanced Raman spectroscopies. *Journal of Molecular Structure* 994, 155–162. doi:10.1016/j.molstruc.2011.03.011
- Frei, E., 1950. Genesis of various forms of soil structure, in: 4th International Congress of Soil Science. Amsterdam, pp. 46–48.
- Fruchart, C., 2014. Analyse spatiale et temporelle des paysages de la forêt de Chailluz (Besançon, Doubs) de l'Antiquité à nos jours. (PhD thesis). Université de Franche-Comté.
- Fruchart, C., Daval, D., Daval, P., Bossuet, G., Dupin, A., Favory, F., Girardclos, O., Grosbois, J.-P., Josserson, J.-P., Laplaige, C., Mosca, P., Nuninger, L., Petit, M., Sordoillet, D., 2014. Besançon et environs (25). Prospection et validation de données LiDAR. Rapport annuel d'activité. Besançon.
- Gaiffe, M., Bruckert, S., 1985. Analyse des transports de matières et des processus pédogénétiques impliqués dans les chaînes de sols du karst jurassien. *Catena*, special issue "Soils and geomorphology" 6, 159–174.
- Gebhardt, A., 2007. Impact of charcoal production activities on soil profiles: the micromorphological point of view. *ArchéoSciences* 31.
- González-Rodríguez, J., Sissons, N., Robinson, S., 2011. Fire debris analysis by Raman spectroscopy and chemometrics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 91, 210–218. doi:10.1016/j.jaap.2011.02.012
- Graçanin, M., 1950. To the problem of evaluation of soil structure, in: Trans. 4th International Congress of Soil Science. Amsterdam, pp. 46–48.
- Guo, Y., Bustin, R.M., 1998. FTIR spectroscopy and reflectance of modern charcoals and fungal decayed woods: implications for studies of inertinite in coals. *International Journal of Coal Geology* 37, 29–53. doi:10.1016/S0166-5162(98)00019-6
- Hillebrecht, M., 1982. Die Relikte der Holzkohlewirtschaft als Indikatoren für Waldnutzung und Waldentwicklung: Untersuchungen an Beispielen aus Südniedersachsen. *Göttinger Geographische Abhandlungen* 79.
- Hodgson, J., 1974. Soil survey field handbook. technical monograph, n°5. Harpenden.
- Izard, V., 1992. L'art du charbonnier: contributions ethno-botanique et géographico-historique à l'étude des paysages métallurgiques d'après l'anthracanalyse des charbonnières. *Bulletin de la Société Botanique de France Actualités Botaniques* 139, 587–596. doi:10.1080/01811789.1992.10827131
- Jones, T.P., Scott, A.C., Cope, M., 1991. Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and implications for studies of fusain. *Bulletin de la Société Géologique de France* 162, 193–200.
- Jongerius, A., Rutherford, G., 1979. Glossary of soil micromorphology. ISSS and Stiboka.
- Karale, R., Bisdom, E., Jongerius, A., 1974. Micromorphological studies on diagnostic subsurface horizons of some of the alluvial soils in the Meerut district of Uttar Pradesh. *Journal of the Indian Society of Soil Science* 22, 70–76.
- Ketterings, Q.M., Bigham, J.M., 2000. Soil Color as an Indicator of Slash-and-Burn Fire Severity and Soil Fertility in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal* 64, 1826. doi:10.2136/sssaj2000.6451826x
- Knapp, H., Robin, V., Kirleis, W., Nelle, O., 2013. Woodland history in the upper Harz Mountains revealed by kiln site, soil sediment and peat charcoal analyses. *Quaternary International* 289, 88–100. doi:10.1016/j.quaint.2012.03.040
- Kohl, F., 1971. Kartieranleitung, Arbeitsgemeinschaft Bodenkunde der Geologischen.
- Kubiena, W., 1938. Micropedology. collegiate Press, Inc. Ames, Iowa.

- Laplaige, C., 2012. Comparaison de signaux (géophysique, LiDAR) utilisés dans l'étude des dynamiques anthropiques et naturelles (PhD thesis). Besançon.
- Lassus, F., 1968. Les établissements métallurgiques en Franche-Comté aux XVIIe et XIXe siècles (PhD thesis). université de Franche-Comté.
- 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, Palaeoecology* 291, 154–165. doi:10.1016/j.palaeo.2009.09.013
- Ludemann, T., Brandt, M., Kaiser, L., Schick, L., 2017. Variation of past wood use across local edaphic gradients reflects tree species ecology – Examples of the fine spatial resolution of kiln site anthracology. *Quaternary International* 1–9. doi:10.1016/j.quaint.2017.03.069
- Malepeyre, A.F., 1836. *Maison rustique du XIXe siècle: encyclopédie d'agriculture pratique. Tome quatrième. Agriculture forestière, législation et administration rurale.*, Au Bureau. ed. Paris.
- Mangin, M., 2004. *Le fer, Errance.* ed. Paris.
- Marié de L'Isle, E.-B., 1835. *Manuel complet des marchands de bois et de charbons, ou Traité de ce commerce en général.* La librairie encyclopédique de Roret, Paris.
- Mathieu, C., Stoops, G., 1972. Observations pétrographiques sur la paroi d'un four à chaux carolingien creusé en sol limoneux. *Archéologie Médiévale* 2, 347–354.
- Morga, R., 2011. Micro-Raman spectroscopy of carbonized semifusinite and fusinite. *International Journal of Coal Geology* 87, 253–267. doi:10.1016/j.coal.2011.06.016
- Mostefaoui, S., Perron, C., Zinner, E., Sagon, G., 2000. Metal-associated carbon in primitive chondrites: structure, isotopic composition, and origin. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64, 1945–1964. doi:10.1016/S0016-7037(99)00409-3
- Munsell, A.H., 2000. *Munsell soil color charts, revised wa.* ed. New Winsor, NY.
- Murchison, D., 1964. Reflectance techniques in coal petrology and their possible application in ore mineralogy. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy* 73, 479–502.
- Namaalwa, J., Hofstad, O., Sankhayan, P., 2009. Achieving sustainable charcoal supply from woodlands to urban consumers in Kampala, Uganda. *International Forestry Review* 11, 64–78. doi:10.1505/ifor.11.1.64
- Nelle, O., 2003. Woodland history of the last 500 years revealed by anthracological studies of charcoal kiln sites in the Bavarian Forest, Germany. *Phytocoenologia* 33, 667–682.
- Nikiforoff, C., 1941. Morphological classification of soil structure. *Soil Science* 52, 193–212.
- Nuninger, L., Fruchart, C., Laplaige, C., Bas, C., Bépoix, S., Bossuet, G., Chenal, T., Crozet, A., Daval, D., Dupin, A., Fovet, E., Georges-Leroy, M., Girardclos, O., Grosbois, J.-P., Jossieron, J.-P., Nouvel, P., Opitz, R., Rossi, A., Ruffaldi, P., Thivet, M., Zimmer, C., 2015. Rapport d'activité au 31 octobre 2015. Chantier "Construction historique des espaces forestiers: dynamiques, ressources et patrimoine" (CHEF). Besançon.
- Nuninger, L., Fruchart, C., Opitz, R., 2010. LiDAR: quel apport pour l'analyse des paysages? *Bulletin AGER* 34–43.
- Opitz, R., Nuninger, L., Fruchart, C., 2015. Thinking topographically about the landscape around Besançon (Doubs, France), in: Kluiving, S., Guttmann-Bond, E. (Eds.), *Landscape Archaeology between Art and Science. From a Multi- to an Interdisciplinary Approach.* Amsterdam university press, pp. 395–412.
- Paradis-Grenouillet, S., 2012. *Etudier les forêts métallurgiques: analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. L'exemple des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin* (PhD thesis). Université de Limoges.
- Perles, C., 1977. *Préhistoire Du Feu*, Masson. ed.
- Pescini, V., Montanari, C.A., Moreno, D.T., 2017. Multi-proxy record of environmental

- changes and past land use practices in a Mediterranean landscape: The Punta Mesco cape (Liguria - Italy) between the 15th and 20th century. *Quaternary International* 1–15. doi:10.1016/j.quaint.2017.03.060
- Pettijohn, F., 1957. *Sedimentary rocks*. Harper and Row, New-York.
- Rouaud, R., 2013. *Les forêts de pente de la haute vallée de la Dordogne : enjeux écologiques et énergétiques* (PhD thesis). Université de Limoges.
- Scott, A., 1989. Observations on the nature and origin of fusain. *International Journal of Coal Geology* 12, 443–475.
- Scott, A., Glasspool, I., 2007. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals. *International Journal of Coal Geology* 70, 53–66.
- Scott, A., Jones, T., 1994. The nature and influence of fire in Carboniferous ecosystems. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 106, 91–112.
- Smith, G.D., Clark, R.J.H., 2004. Raman microscopy in archaeological science. *Journal of Archaeological Science* 31, 1137–1160. doi:10.1016/j.jas.2004.02.008
- Speight, J.G., 1994. *The chemistry and technology of coal*, 2nd editio. ed. CRC press, New-York.
- Stoops, G., Jongerius, A., 1975. Proposal for a micromorphological classification of soil materials. I. A classification of the related distributions of fine and coarse particles. *Geoderma* 13, 189–199.
- Syred, C., Griffiths, A.J., Syred, N., Beedie, D., James, D., 2006. A clean, efficient system for producing Charcoal, Heat and Power (CHaP). *Fuel* 85, 1566–1578. doi:10.1016/j.fuel.2005.10.026
- Ulery, A.L., Graham, R.C., 1993. Forest Fire Effects on Soil Color and Texture. *Soil Science Society of America Journal* 57, 135. doi:10.2136/sssaj1993.03615995005700010026x
- United States Department of Agriculture, 1951. *Soil survey manual*, in: *Agricultural Handbook*. U.S. Department of Agriculture, Washington DC.
- Wehr, A., Lohr, U., 1998. Airborne laser scanning-an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 68–82.
- Wheeler, J., 2011. Charcoal analysis of industrial fuelwood from medieval and early modern iron-working sites in Bilsdale and Rievaulx, North Yorkshire, UK: evidence for species selection and woodland management. *Environmental Archaeology* 16, 16–35.
- Williams, Q., 1995. Infrared, Raman and optical spectroscopy of Earth materials, in: *Mineral Physics & Crystallography: A Handbook of Physical Constants*. American Geophysical Union, pp. 291–302.
- Woronoff, D., 1990. *Forges et forêts: recherches sur la consommation proto-industrielle de bois*. Edition de l'école des Hautes Etudes en Sciences Sociales.
- Woronoff, D., 1984. *L'industrie sidérurgique en France pendant la Révolution et l'Empire*. Ecole des hautes études en sciences sociales.

Discussion générale et conclusions

1. Périodes probables d'utilisation des plateformes de charbonnage en forêt de Chailluz et destination du charbon produit

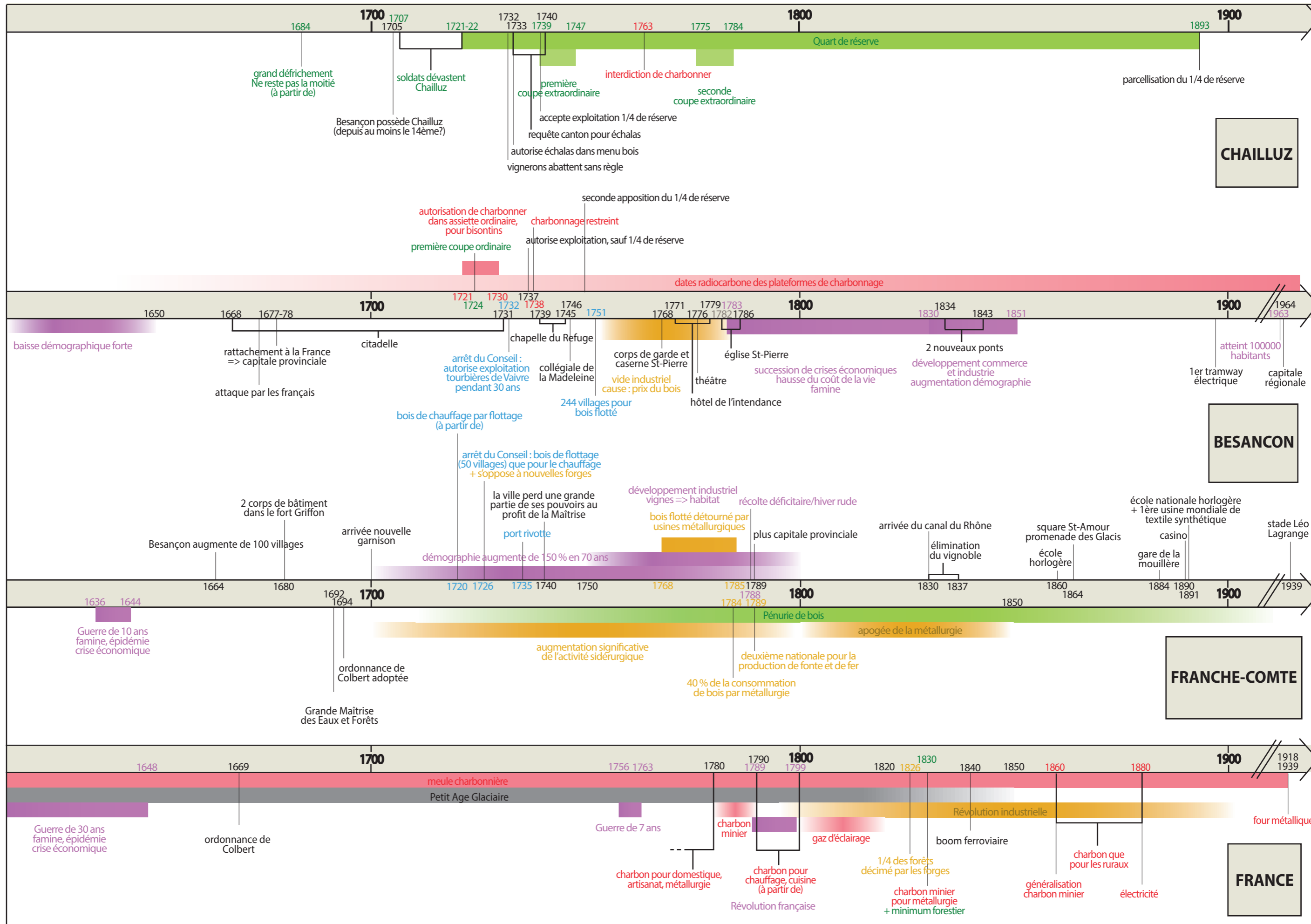
Les résultats micromorphologiques et spectroscopiques raman de la plateforme de charbonnage CH29 en forêt de Chailluz ont permis de confirmer la réutilisation intensive de des places à charbon du massif (4 à 5 fois par an) sans interruption longue du charbonnage (**chapitre 5**), en adéquation avec la littérature et l'étude dendro-anthracologique des charbons des plateformes, qui indiquent une réutilisation de celles-ci tous les 15-20 ans (**chapitre 4**). Ce charbonnage a eu lieu entre le milieu du XVII^{ème} siècle et nos jours d'après les datations radiocarbone des places (**chapitre 3**).

Dans le but de situer plus précisément ce charbonnage au sein de ces trois siècles probables, nous proposons ici de synthétiser les données archivistiques acquises durant ce travail de thèse concernant toutes informations susceptibles de caractériser l'exploitation forestière à l'échelle de Chailluz, de Besançon, de la région et de la France (**figure 6.1**). De nombreux indices archivistiques et provenant de la littérature ont effectivement permis de confirmer que la forêt de Chailluz était fortement exploitée en réponse aux besoins de la ville de Besançon en bois de chauffage et en bois d'architecture, et aux besoins de l'industrie métallurgique régionale. La suite de ce paragraphe résulte de ce travail de synthèse.

Figure 6.1 : Frises chronologiques résumant les événements importants du XVIIème au XIXème siècle, à quatre échelles d'observation différentes.

De haut en bas : à l'échelle de la forêt de Chailluz, à l'échelle de Besançon, à l'échelle de la Franche-Comté, et à l'échelle de la France.

Les couleurs définissent cinq thèmes : le rose pour le charbonnage, le vert pour le bois en général, le jaune pour la métallurgie, le violet pour la démographie et le bleu pour le bois de chauffage.



1.1 Le charbonnage avant la seconde moitié du XVII^{ème} siècle

Les prélèvements de charbons datés au radiocarbone ayant été réalisés systématiquement au moins au plus profond du profil charbonneux des plateformes nous pouvons donc considérer que nous avons daté la dernière longue période d'utilisation (**chapitre 5**). Le substrat calcaire et le profil charbonneux étant séparés par plusieurs centimètres d'épaisseur d'une couche stérile nous pouvons effectivement supposer que des utilisations antérieures ont eu lieu bien avant le milieu du XVII^{ème} siècle. En effet, leurs vestiges pédologiques d'apparaissant pas dans le profil de sol des plateformes ils ont pu être érodés au cours du temps. La baisse démographique bisontine du début du XVII^{ème} siècle, en raison de la Guerre de 30 ans qui sévissait en France, peut alors expliquer la restriction d'utilisation des plateformes de Chailluz entre la période datée au radiocarbone et celles bien antérieures, non identifiées dans les profils de sol des plateformes. La crise économique de l'époque, la famine et les épidémies engendrées par cette guerre ont ainsi pu être néfastes à la production de charbons, la rendant épisodique durant cette première moitié du XVII^{ème} siècle.

1.2 Le charbonnage durant la seconde moitié du XVII^{ème} siècle

L'augmentation du baillage de Besançon de 100 villages en 1664 n'a sans doute pas eu de conséquences significatives sur la production de bois de chauffage provenant de la forêt de Chailluz puisque cette forêt semble avoir été dédiée exclusivement aux besoins de la ville-même. Toutefois, le rattachement de Besançon au Royaume de France et son nouveau statut de capitale provinciale en 1677-1678 ont certainement entraîné une amélioration des conditions de vie sur le territoire à partir de la fin du siècle, rendant alors Besançon plus attractive à la population.

Dans les faits certains à notre connaissance, la fin du XVII^{ème} siècle a été marquée par la construction de nouveaux bâtiments tels que la citadelle de la ville et deux bâtiments militaires pour la garnison du Royaume. Ces constructions ont sans nul doute eu une ampleur conséquente sur la production du bois d'architecture sur le territoire bisontin. Le grand défrichement de la forêt de Chailluz attesté en 1684, durant lequel la moitié du massif a été exploité, résulte certainement majoritairement de ce besoin en bois d'architecture, puisqu'aucun texte, actuellement, ne confirme un accroissement démographique bisontin suffisant pour justifier un impact significatif sur la production de bois de chauffage de cette forêt.

Les registres de compte et impôts des AMB cotées de CC1 à CC342, ainsi que les registres paroissiaux de 1543 à 1794 de la série GG des AMB, pourraient néanmoins fournir des informations précieuses sur l'évolution démographique de la fin du XVII^{ème} siècle. De même, les AMB BB 53, 54, 59, 85, 92, 96, 97 et DD152 et DD154 semblent peindre un mauvais état de la forêt de Chailluz au cours du XVII^{ème} siècle, comprenant une production de charbon de bois épisodique à l'échelle individuelle et une production de bois d'architecture pour la construction des remparts de la ville et des corps de garde suffisamment conséquente pour être mentionnée. Ces archives font également mention du bois flotté sur le Doubs et arrivé au port Rivotte. Il serait alors plus que judicieux d'en faire l'analyse dans le but de compléter et de confirmer nos interprétations faites sur la production de bois de la forêt de Chailluz durant la seconde moitié du XVII^{ème} siècle.

Ainsi, dans l'état actuel de nos connaissances le profil de sol des plateformes de charbonnage analysées, qui révèle une activité charbonnière soutenue en forêt de Chailluz, ne concorde pas avec la gestion forestière du massif durant cette période. Le charbonnage de la

seconde moitié du XVII^{ème} siècle, semblant épisodique et non majoritaire au sein du reste de la production de bois, ne peut pas être responsable du profil de sol observé. Les indices micromorphologiques de ce charbonnage ont dû être, soit totalement érodés, soit partiellement érodés laissant quelques charbons fugaces dans la stratigraphie des plateformes qui ont pu être repris lors de l'utilisation postérieure intensive de ces places.

1.3 Le charbonnage au XVIII^{ème} siècle

Le XVIII^{ème} siècle fut marqué à l'échelle franc-comtoise par l'augmentation significative de l'activité sidérurgique. A l'échelle du territoire bisontin, il fut marqué par une augmentation démographique de 150%, et de nombreuses constructions ont débuté ou ont été terminées dans la ville. Nous supposons ici que ces derniers faits sont une conséquence directe de l'amélioration des conditions de vie de la ville qui a certainement débuté à la fin du siècle précédent, en raison du rattachement de Besançon au Royaume de France et de l'évolution de son statut au rang de capitale provinciale.

L'essor de ces grands consommateurs de bois durant ce siècle, et en particulier l'activité sidérurgique comtoise qui consommait 40% de la production totale de bois en 1784, ont entraîné une pénurie de bois à l'échelle régionale durant le XVIII^{ème} siècle.

A l'échelle de Besançon cette pénurie s'est faite ressentir au travers de la difficulté d'approvisionnement en bois de chauffage qui nécessita l'importation de bois par flottage sur le Doubs à partir de 1720 (**chapitre 2**), et l'exploitation des tourbières de Vaivre sur 30 ans à partir de 1732 (**AMB DD155** à analyser, **annexe 3**). De même, l'arrêt du conseil de 1726 s'opposant à l'installation de nouvelles forges sur le territoire bisontin est un indice, d'une part, de la pénurie de bois qui sévissait alors, et d'autre part, de la responsabilité de l'activité métallurgique dans cette pénurie. Le détournement par les usines métallurgiques du bois de chauffage bisontin flotté sur le Doubs, avéré au moins entre 1768 et 1785, permet d'ailleurs de démontrer que les besoins en bois de cette activité étaient insatisfaits par la production qui lui était dédiée de prime abord. L'**AMB DD156 (annexe 3)** semble de plus prouver que l'interdiction d'installer de nouvelles forges sur le territoire était alors exclusivement motivée par le vol du bois de chauffage flotté.

A l'échelle de la forêt de Chailluz de nombreux indices archivistiques laissent penser que la pénurie de bois qui sévissait durant le siècle a entraîné une priorisation des besoins aidée par l'apposition du quart de réserve en 1721-22 et la mise en régie des trois quart restant en 30 parcelles égales préconisées par la publication de l'ordonnance de Colbert. Priorité semble ainsi avoir été faite au besoin en bois de chauffage de la ville, comme l'atteste l'autorisation de charbonner dans le massif de 1721 à 1730 à la condition que le charbon produit soit vendu aux bisontins. De plus, à la fin du siècle plus de la moitié de la production des assiettes ordinaires était destiné aux habitants (**chapitre 2**). La première assiette ordinaire de 1724 pourrait également être un indice de cette priorisation du bois de chauffage, toutefois il serait intéressant de consulter les archives traitant de cette coupe pour prouver alors que la production de ce bois sortant était réellement à destination des habitants de la ville. Les besoins en bois d'architecture pour la construction des bâtiments militaires semblent par ailleurs avoir été favorisés par rapport au bois de chauffage durant la première coupe extraordinaire, c'est-à-dire de 1739 à 1747. En effet, la seule motivation de cette coupe pourrait avoir été uniquement induite par ce besoin en bois d'architecture. De plus, le bois acheminé sur le chantier des casernes militaires a d'abord été sélectionné pour la construction des bâtiments puis le restant du bois a été redirigé dans la ville pour le chauffage et/ou la cuisine des bisontins (**chapitre 2**). Le bois à destination des usines métallurgiques semble avoir été la dernière priorité à contenter dans cette forêt durant ce siècle. La restriction du charbonnage en 1738, puis son interdiction totale en 1763 laissent effectivement présager que

peu de place ait été donnée à cette activité. L'absence de données textuelles attestant de la production de bois pour la métallurgie semble aller également dans ce sens. Dans ces conditions, il serait logique de conclure que le charbonnage en forêt de Chailluz ait été tenu durant le XVIII^{ème} siècle.

Or, durant la première coupe extraordinaire les besoins en bois de construction des casernes ne semblent pas avoir été satisfaits, rendant nul l'impact de ce consommateur de bois sur la production forestière de Chailluz. De plus, le bois de chauffage des bisontins pouvait être consommé à l'état de charbon comme l'atteste l'article 6 du cahier des charges du quart de réserve de 1738 (**figure 2.1**), et l'autorisation entre 1721 et 1730 de charbonner dans l'assiette ordinaire sous condition que le charbon soit vendu aux habitants. Cette consommation de charbons par le plus grand consommateur de bois de la forêt de Chailluz a alors sans nul doute motivé la possibilité de charbonner dans le quart de réserve durant la première coupe extraordinaire décrite dans l'article 7 du premier cahier des charges, et les articles 11 et 12 du second. La production de charbon a d'ailleurs été observée dans le quart de réserve par le Grand Maître des Eaux et Forêts le 20 mai 1739 (**AMB DD115**). Un an plus tard, ce charbon produit avec le bois et la chaux, résultent de l'exploitation du tiers du quart de réserve représentant alors une importante quantité de bois (**AMB DD115**). Par ailleurs, il a été vendu semble-t-il en intégralité mais à des fins non connues. Nous pouvons alors imaginer que puisque l'adjudicataire du quart de réserve semblait plus intéressé à faire du profit que de respecter le règlement instauré pour l'exploitation du quart de réserve, et puisque l'activité métallurgique sur le territoire bisontin était restreinte, voire interdite, alors l'adjudicataire a très bien pu vendre le charbon de bois produit durant la coupe extraordinaire aux forges et usines du territoire, cette vente étant certainement plus lucratives que celle destinée aux bisontins. Cette interprétation est d'autant plus plausible que la production de bois de cette coupe extraordinaire aurait pu permettre d'alimenter annuellement deux usines comtoises de taille moyenne ou 13 à 19 usines de petite taille.

Le charbonnage intensif en forêt de Chailluz, révélé par l'étude archéométrique des plateformes, pourrait ainsi tout à fait concorder avec le contexte décrit ici du XVIII^{ème} siècle. Il faudrait néanmoins vérifier que ce contexte s'étende de part et d'autre de la première coupe extraordinaire, c'est-à-dire avant 1739 et au-delà de 1747. L'analyse des AMB traitant de la seconde coupe extraordinaire pourrait alors être un bon début de vérification, d'autant plus que les datations au radiocarbone des places à charbon fournissent une forte probabilité d'occurrence entre les deux coupes extraordinaires.

L'apparition du charbon minier durant les années 1780-1790 relégua le charbon de bois au seul usage domestique dès la fin du siècle, laissant ainsi présager d'une production de charbon de bois bien moindre que ce que nous avons interprété durant le reste du siècle. D'ailleurs, la Révolution française, ayant entraîné la perte du rang de Besançon comme capitale provinciale, ainsi que la situation climatique peu favorable, ayant entraîné des difficultés économiques dès 1783, et en particulier en 1788 à l'échelle de la cité, semblent avoir directement impacté la démographie et le coût de la vie sur le territoire. Le charbonnage de la fin du XVIII^{ème} siècle ne devait alors qu'être épisodique en forêt de Chailluz, et être peu, si ce n'est pas, caractérisé dans les profils de sol des places à charbon.

1.4 Le charbonnage au XIX^{ème} siècle

La pénurie de bois qui sévissait déjà au XVIII^{ème} siècle en Franche-Comté se poursuit jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle, dont le minimum forestier à l'échelle nationale fut atteint dans les années 1830. L'une des causes majeures de cette pénurie peut être la révolution industrielle touchant l'ensemble du XIX^{ème} siècle, d'autant plus qu'en 1826 un quart des forêts françaises ont été décimées par les forges. D'ailleurs la métallurgie comtoise connaît

son apogée durant la première moitié de ce siècle. Toutefois, la généralisation du charbon minier et l'apparition du gaz d'éclairage au début du siècle ont relégué le charbon de bois à la consommation exclusivement rurale dès 1860, jusqu'à finalement presque disparaître dès 1880 avec le développement de l'électricité. A l'échelle du territoire bisontin la pénurie de bois semble être causée par le développement du commerce et de l'industrie, induisant une amélioration économique et sociétale et une augmentation démographique. Ainsi la consommation de bois de chauffage et de bois de construction a vraisemblablement d'avantage impacté le couvert forestier bisontin que l'activité métallurgique pour laquelle le charbon minier était le combustible principal.

Dans ces conditions, le charbonnage en forêt de Chailluz, s'il était intensif durant le XIX^{ème} siècle, devait être exclusivement à destination du bois de chauffage bisontin. Toutefois, le bois de chauffage, nous l'avons vu précédemment, était pour majorité à l'état de bois et non de charbon de bois. Nous pouvons donc supputer que le charbonnage avait une ampleur bien moindre au XIX^{ème} siècle qu'au milieu du XVIII^{ème} siècle, ne pouvant alors pas justifier les caractéristiques du profil stratigraphique observé des plateformes analysées. Les profils de sol observés des places à charbon de la forêt de Chailluz mettent donc en lumière l'intensivité de la pratique durant le XVIII^{ème} siècle. Nous gardons par ailleurs à l'esprit que durant ce travail de thèse, l'étude archivistique des XVII^{ème} et XIX^{ème} siècles a été insuffisante pour caractériser catégoriquement la production de bois de la forêt de Chailluz. Elle nécessiterait un travail de recherche à part entière.

1.5 Le charbonnage au XX^{ème} siècle

De nombreux indices archéométriques tendent à démontrer que les plateformes de charbonnage étaient utilisées que jusqu'à l'entre-deux-guerres puisqu'ils révèlent l'utilisation par meule traditionnelle et non pas par four métallique. En effet, en four métallique le front de propagation de carbonisation est homogène au sein de l'édifice, suggérant une homogénéisation des températures de la cheminée à la périphérie (**annexe 2**). A l'inverse, en meule traditionnelle le front de propagation est différentiel entraînant une diminution de températures de la cheminée, où les températures sont irrégulières, à la périphérie de l'édifice (**annexe 1**). Cette observation a d'ailleurs été attestée par l'utilisation de thermocouples au sein d'une charbonnière expérimentale en meule, qui a permis de déterminer des températures allant de 550 à 850°C dans la cheminée, et moins de 600°C en se rapprochant de l'extérieur de la meule (**Paradis-Grenouillet, 2012**). L'analyse géophysique des plateformes CH29 et CH30 de la présente étude donnent des résultats hétérogènes du centre à la périphérie de la plateforme, cohérents avec des températures plus fortes dans la cheminée des charbonnières en meule qu'en périphérie. De plus, les résultats raman, la présence d'agrégats rubéfiés rouges, ainsi que la présence de fusinites dans le profil de sol au centre de la plateforme CH29 fournissent des températures atteintes lors des carbonisations de l'ordre des températures définies dans la cheminée d'une meule traditionnelle. Les caractères micromorphologiques de la plateforme CH29 permettent même de préciser que la couche la plus superficielle du profil de sol, épaisse de plusieurs centimètres, présente des indices d'une reprise du fonctionnement naturel de la formation pédologique. Aucune utilisation de la plateforme n'a donc été faite après l'entre-deux-guerres. En effet, dans l'hypothèse où une charbonnière ait été conduite en four métallique après cette période, l'étude micromorphologique aurait, sans doute, au moins fourni des indices de compaction prononcée du sol.

Pour comparer l'empreinte magnétique laissée sur la plateforme de charbonnage par l'utilisation d'un four métallique avec celle laissée par la meule traditionnelle il serait intéressant de mener une prospection magnétique sur une plateforme de charbonnage où la fabrication du charbon de bois ait été réalisée en four métallique. Les résultats géophysiques

de surface des deux plateformes analysées de Chailluz pourront alors être formellement comparés avec ces deux empreintes. L'interprétation faite de la production de charbons en meule traditionnelle pourrait ainsi être confortée, et *a fortiori* l'interprétation de la période butoir de cette production à l'entre-deux-guerres le serait également. De plus, les mesures géophysiques, spectroscopiques raman et micromorphologiques ayant été réalisées sur une ou deux plateformes au sein du massif de Chailluz, les résultats ne sont peut-être pas représentatifs de l'ensemble de la forêt. Il faudrait alors répéter ces mesures sur plusieurs autres plateformes. Plus précisément, il serait intéressant d'obtenir des résultats significatifs dans les trois groupes de types de stations forestières identifiées au cours de la présente étude. Dans la même optique, l'analyse raman et l'étude micromorphologique pourraient être menée sur des profils de sol localisés non plus seulement où la cheminée semble avoir été érigée, mais également en périphérie de celle-ci.

Il reste un point obscur qu'il faudrait éclaircir : Les deux cahiers des charges de 1738 et 1743, sur la première coupe extraordinaire du quart de réserve, font mention à deux reprises de « fosses à charbon » pour parler des endroits où le charbon devait être fabriqué (article 7 du cahier des charges de l'AMB DD112 et article 12 de celui de l'AMB DD115. **Figure 2.1**). Il serait alors crucial de déterminer si ce terme est un mot générique que les instances ont gardé dans leur lexique puisqu'il s'agissait d'un type de fabrication du charbon répandu au moins jusqu'à l'âge du Fer (Mangin, 2004), ou si elles utilisaient ce terme puisque le charbon de bois était effectivement fabriqué en fosse durant la première coupe extraordinaire. Si cette seconde option est correcte alors l'ensemble des plateformes détectées dans le quart de réserve, apparentées aux plateformes de charbonnage en meule (*cf. supra*) n'ont pas été utilisées durant cette période.

Il faudrait alors dépouiller les AMB comprenant le cahier des charges de la seconde coupe extraordinaire par exemple, ou encore celles traitant de l'exploitation de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz, pour déterminer si ce terme de « fosse à charbon » a été utilisé durant l'ensemble des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles et à l'échelle de la forêt dans son entier.

Toutefois, un premier élément de réponse tant à démontrer qu'il ne s'agit là que d'un terme générique employé dans les cahiers des charges des différentes exploitations du massif. En effet, la prospection LiDAR faite sur le massif n'a *a priori* révélé aucune entité archéologique pouvant être apparentée à de telles fosses durant les siècles concernés. Si la fabrication de charbon a été faite en fosse, elle a alors été ponctuelle, en complément du charbonnage en meule traditionnelle.

2. Etat de la forêt de Chailluz au XVIII^{ème} siècle

Les spectres anthracologiques des charbons des plateformes de la forêt de Chailluz donnant l'image des peuplements présents au moment du charbonnage (**chapitre 3**), nous pouvons alors caractériser les peuplements présents dans les trois groupes de types de stations de cette forêt durant le XVIII^{ème} siècle. Plus précisément, nous venons de démontrer que les caractéristiques micromorphologiques des plateformes observées dans ce massif, résultant d'un charbonnage intensif sur une longue période de temps (**chapitre 5**), concordent d'avantage avec le contexte historique et sociétal de la période comprise entre les années 1720 et 1780.

L'intérêt n'est pas ici de répéter les interprétations faites de l'étude anthracologique et dendro-anthracologique des charbons des plateformes de charbonnage (**chapitre 3 et 4**). En revanche, les résultats de cette étude, confrontés à la transcription de Séverine Dianin d'AMB décrivant les peuplements présents en forêt de Chailluz en 1750 (Dianin, 1995), permettent de

confirmer qu'ils caractérisent les peuplements forestiers présents au cours de cette moitié du siècle (**figure 6.2**). Le terme de « futaie » n'est pas employé dans la description de 1750 puisque, nous le rappelons, au XVIII^{ème} siècle les termes « taillis », « gaulis », « demi-futaye » et « haute-futaye » caractérisaient uniquement l'âge des tiges (**introduction**).

Dans les trois groupes de types de stations les dominances des taxons principaux sont identiques dans la description du couvert forestier de 1750 et celle issue de l'anthraco-analyse de la présente étude. Par ailleurs la description de 1750 précise l'âge le plus représenté de ces taxons.

Dans le quart de réserve trois générations d'arbres ont été décrites. La première est dominée par le chêne, le hêtre, le charme et autres bois blancs. La seconde, plus âgée, est assez peu décrite mais semble présentée quelques hêtres. Et la troisième génération, bien plus âgée, est représentée par quelques chênes. Il est intéressant de constater qu'en 1750, donc 3 ans après la fin de la première coupe extraordinaire, le peuplement forestier présent dans le quart de réserve semblait avoir été lourdement exploité, comme nous avons pu également le constater au travers de l'analyse des AMB traitant de cette coupe (**chapitre 2**). La transcription de Séverine Dianin mentionne la présence de « quelques » arbres quel que soit la génération observée : Il persistait quelques chênes de futaie bien plus âgés que 40 ans, quelques hêtres de près de 25 ans d'âge et quelques bois blancs dans le taillis jeune. Seuls le chêne, le hêtre et le charme en taillis jeune semblent être encore bien présents en 1750. Au regard de l'analyse dendro-anthracologique, le charbon produit peut tout à fait correspondre à la consommation du taillis jeune et des pieds-francs de hêtre durant la première coupe extraordinaire. N'ayant quasi pas retrouvé de chênes ni dans les spectres anthracologiques, ni dans la transcription de Séverine Dianin cela peut sous-entendre que ce taxon ait été exploité à d'autres fins que le charbonnage. Plus précisément, il est fort probable que les pieds-francs de chêne aient été utilisés pour la construction des casernes militaires. Il serait intéressant d'aller vérifier cette hypothèse à travers l'étude des bois de charpente de ces bâtiments, ce qui permettrait également de vérifier que le bois exploité du quart de réserve, initialement prévu pour la construction des casernes, ait effectivement servi à ça. Un élément de réponse réside dans les AMB de la première coupe extraordinaire, où il est fait mention le 17 août 1740 que le tiers de la totalité à exploité a déjà été vendu en charbon et en bois, sans pour autant être acheminé sur le chantier des casernes. Si ces pieds-francs de chêne n'étaient alors pas utilisés pour le charbonnage, ni pour la construction des casernes, alors à quel(s) autre(s) consommateur(s) étaient-ils destinés ? Sans doute faudrait-il alors se tourner vers l'activité sidérurgique qui, rappelons-le, était en pleine expansion durant ce siècle dans la région.

L'aspect clairsemé décrit du quart de réserve après la coupe extraordinaire est également un indice de la contemporanéité du charbonnage décrit à travers l'analyse dendro-anthracologique et le peuplement forestier de 1750. En effet, la forte présence d'héliophiles dans les spectres anthracologiques de cette partie de la forêt laisse penser à un milieu dégradé pouvant tout à fait résulter d'une forte exploitation forestière. D'ailleurs, nous le rappelons, durant les phases intensives de charbonnage peu d'essences étaient épargnées et les arbres fruitiers ne faisaient pas exceptions (**Izard, 1992**).

L'analyse archéométrique des plateformes de charbonnage du quart de réserve et les données textuelles et archivistiques traitant de cet espace confirment donc que l'activité charbonnière était fortement active pendant l'apposition du quart de réserve, et en particulier durant la première coupe extraordinaire. Il serait évidemment intéressant de traiter toutes autres archives abordant l'exploitation et la seconde apposition du quart de réserve pour confirmer cette interprétation à l'échelle du XVIII^{ème} siècle au complet.

Les groupes de types de stations sur versant et de la zone à chailles sont décrit en deux parties dans la transcription du couvert forestier de 1750. La partie orientale de la forêt n'a *a priori* pas été exploitée, laissant sous-entendre qu'elle ne l'a pas été depuis la première coupe ordinaire de 1724, soit 26 ans avant cette description. Sachant que les assiettes ordinaires étaient au nombre de 30 cela signifierait que la partie orientale, représentant la moitié du quart restant de la forêt, ne comprenait que 4 assiettes. Nous pouvons donc douter de cette description, ou du moins, la remettre en question. Compte tenu du fait que le cahier des charges de la première coupe extraordinaire n'a pas été scrupuleusement suivi durant l'exploitation il est possible que l'assiette ordinaire ne l'ait pas été non plus, restant localisée dans la partie orientale de la forêt. La transcription de 1750 fait d'ailleurs mention de taillis dans cette partie ne dépassant pas 25 ans d'âge, corroborant cette idée d'une exploitation localisée à l'ouest de la forêt au moins entre 1724 et 1750. La description de la partie occidentale fait mention d'une dominance de chêne, que l'on retrouve dans les spectres anthracologiques de la zone à chailles. Le charme et le hêtre de cette partie sont également en adéquation avec les taxons identifiés des charbons produits dans cette zone. Cette concordance taxonomique démontre que le charbonnage dans cette partie de la forêt a donc très bien pu être intensément actif durant cette période. En allant plus loin, l'anthraco-analyse donne l'image d'un peuplement moins dégradé avant son exploitation, par la présence de post-pionniers et l'absence d'héliophiles dans les spectres, ainsi que par la présence d'une futaie composée essentiellement de chênes et de hêtres. A partir de 1750, donc après ou pendant le charbonnage la futaie n'est plus évoquée et nous pouvons donc supposer que l'exploitation de cette partie, en particulier pour le charbonnage, a été responsable d'une modification de la structure du peuplement forestier présent, passant d'un TSF à un taillis, mais où les dominances taxonomiques restent les mêmes.

Les spectres anthracologiques des plateformes de la partie orientale correspondent à la description du peuplement présent de 1750. Pourtant, la présence de vieilles souches laisse présager d'un état plutôt à l'abandon de cette partie de la forêt (**figure 6.2**). L'analyse anthracologique, peint au contraire l'image d'un TSF, certes plus dégradé que dans le centre de la forêt, mais toutefois moins ouvert que sur le versant. Cette discordance entre l'image du peuplement décrit en 1750 et celle décrit par l'analyse anthracologique des plateformes de charbonnage suggère que le charbonnage a été postérieur à cet état de 1750, d'autant plus que la transcription de Séverine Dianin précise que cette partie de la forêt n'était pas encore exploité en 1750.

La contemporanéité des plateformes de charbonnage de la partie orientale et de la partie occidentale peut alors être remise en question, ou du moins, ne sont-elles pas strictement synchrones. L'analyse archivistique menée durant ce travail de thèse a été plus que lacunaire concernant la recherche d'informations de l'assiette ordinaire de Chailluz. Il serait donc nécessaire de la mener à bien dans le but, notamment, d'éclaircir ce problème de synchronicité de l'activité charbonnière dans les parties est et ouest de la forêt de Chailluz.

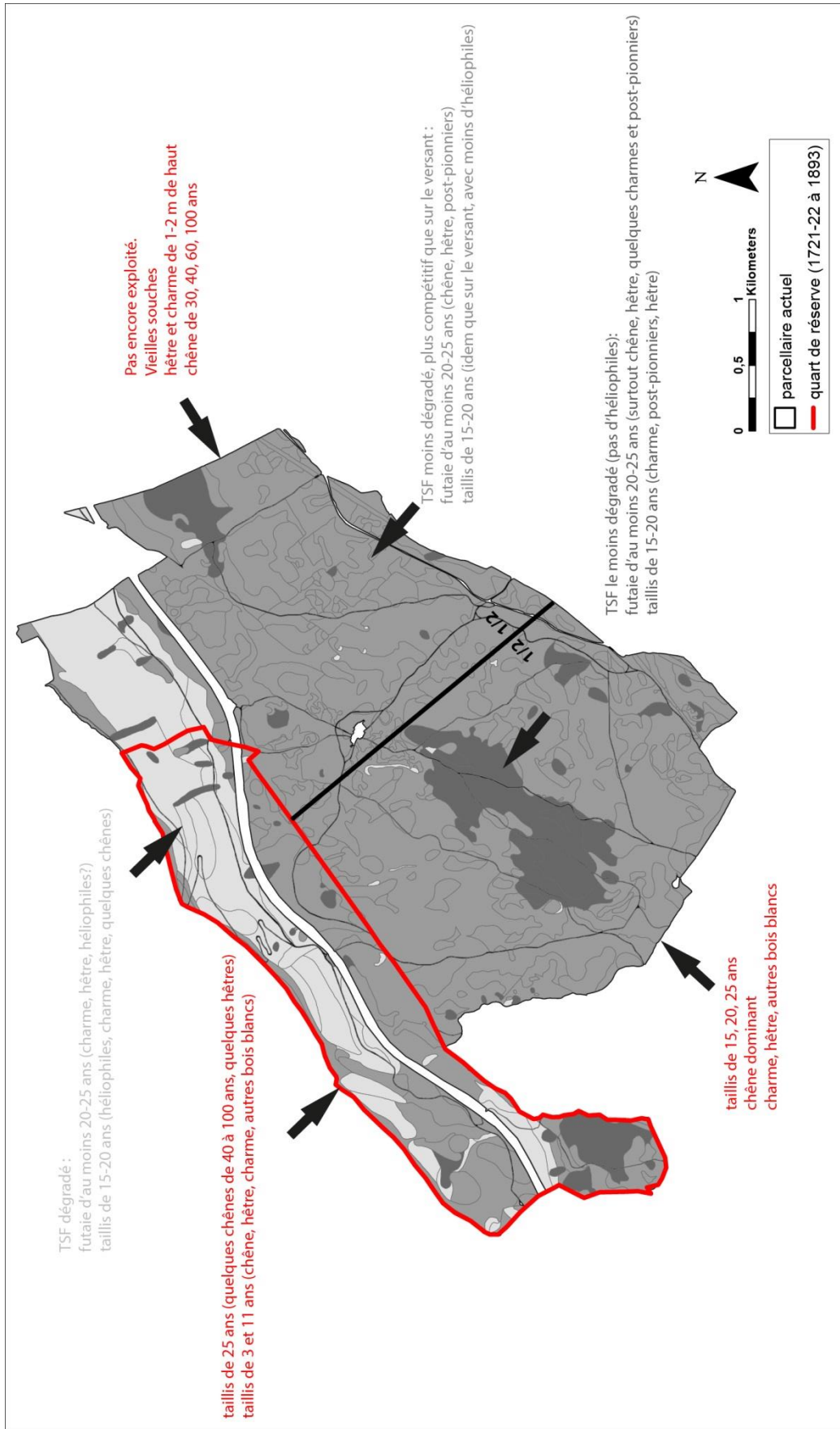


Figure 6.2 : Confrontation des descriptions des peuplements forestiers présents au cours du XVIIIème siècle. En rouge, la transcription de Séverine Dianin des AMB DD113 n°8 et 59 et DD132 n°8, pour l'année 1750. En nuance de gris, à partir de l'étude archéométrique des charbons des plateformes de la présente étude.

3. Impact du charbonnage sur le couvert forestier de Chailluz aux époques moderne et contemporaine

L'intensivité du charbonnage en forêt de Chailluz mise en évidence au cours de ce travail de thèse par les analyses archéométriques des places à charbon ainsi que le contexte historique des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles décrit précédemment grâce à l'étude archivistique, attestent de la pression oppressante d'au moins deux grands consommateurs de bois sur le couvert forestier de la forêt de Chailluz, et plus largement des forêts bisontines, durant ces siècles. L'industrie métallurgique et les bisontins sollicitaient fortement la ressource en bois, certainement à l'état de charbon de bois. Ce charbonnage en forêt de Chailluz, et plus précisément dans le quart de réserve, la violation des règlements forestiers par l'adjudicataire et par l'industrie métallurgique, ainsi que la nécessité de faire parvenir du bois de chauffage par flottage sur le Doubs, sont également des indices sûrs de leur responsabilité dans la pénurie de bois qui sévissait sur le territoire bisontin durant ces siècles. Leurs impacts sur la composition des forêts bisontines à l'échelle structurale et floristique sont sans nul doute considérables.

La **figure 6.3** représente le couvert forestier présent du XVIII^{ème} siècle à nos jours. Ces 4 représentations ont été construites à partir des cartes historiques de Cassini et de l'Etat-major pour les XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles, et de deux cartes forestières élaborées par l'institut national de l'information géographique et forestière pour les deux représentations actuelles. Ces 4 cartes sont disponibles sur geoportail.gouv.fr.

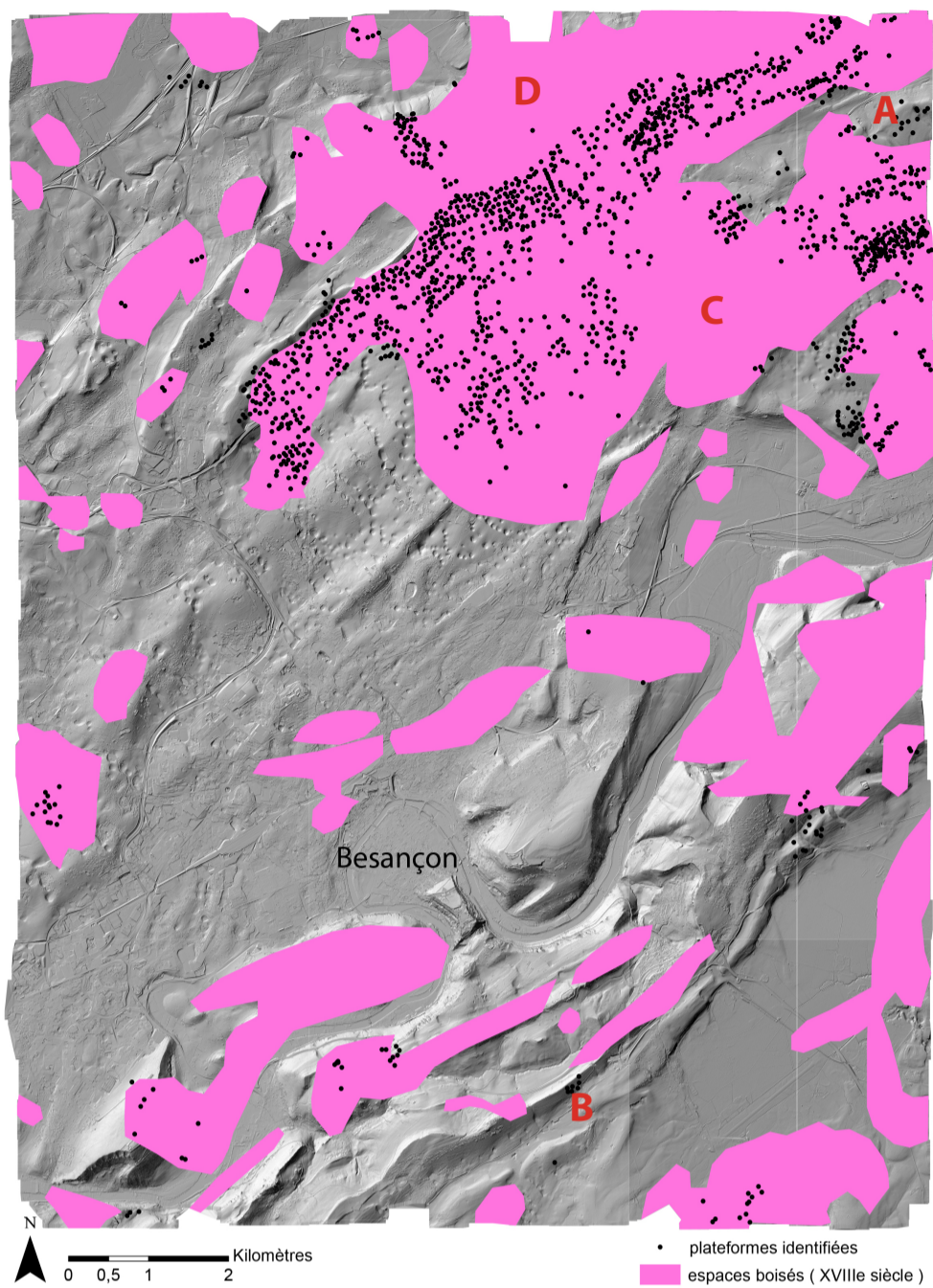
Sur cette figure nous pouvons remarquer que la forêt bisontine du XVIII^{ème} siècle était plus étendue qu'au XIX^{ème} siècle, en particulier les forêts autres que la forêt de Chailluz. Cette information spatiale laisse présager de la forte sollicitation des autres forêts bisontines au cours du XVIII^{ème} siècle. Nous l'avions effectivement évoqué dans le chapitre 2 de ce manuscrit, mais sans réellement pouvoir donner de données chiffrées sur la consommation du bois de ces forêts pour le bois de chauffage bisontin. Une étude complémentaire devrait être faite sur ces forêts pour compléter les informations traitant des ressources en bois de la ville durant ce siècle. A l'échelle de Chailluz la surface forestière ne semble pas avoir évolué significativement du XVIII^{ème} au XIX^{ème} siècle. Il faut toutefois souligner que la représentation du couvert forestier du XVIII^{ème} siècle a été laborieuse, ou du moins, approximative par endroits en raison du manque de précision des dessins de la forêt sur la carte de Cassini.

Sur la représentation du XVIII^{ème} siècle 121 plateformes de charbonnage identifiées par prospection LiDAR sont en dehors du couvert forestier, dont 42 à la lisière. Sur celle du XIX^{ème} siècle 41 sont en dehors de ce qu'on a interprété du couvert forestier, dont 31 extrêmement proches. Sur les 2 représentations actuelles, seulement 4 et 3 plateformes sont en dehors du couvert forestier et à la lisière des forêts. Cette observation à large échelle corrobore l'idée que les deux cartes historiques fournissent une précision malheureusement discutable des surfaces forestières. En revanche, à une échelle d'observation plus locale certains ensembles de plateformes de charbonnage peuvent être datés de par leur localisation évidente en dehors du couvert forestier. Nous rappelons ici que la littérature fait mention de charbonnage en forêt et non en dehors pour des raisons pratiques (**chapitre 3**). Le groupe de plateformes A sur la figure 6.2 est nettement en dehors de la forêt du XVIII^{ème} siècle et compris dans celle du XIX^{ème}. Cet espace étant clairement ouvert sur la carte de Cassini, il est alors fort probable que les plateformes s'y trouvant aient fonctionné durant le XIX^{ème} siècle. Pour la même raison, le groupe de plateformes B a certainement fonctionné durant ce siècle. Les deux grands espaces boisés C et D, vides de plateformes de charbonnage durant ces deux

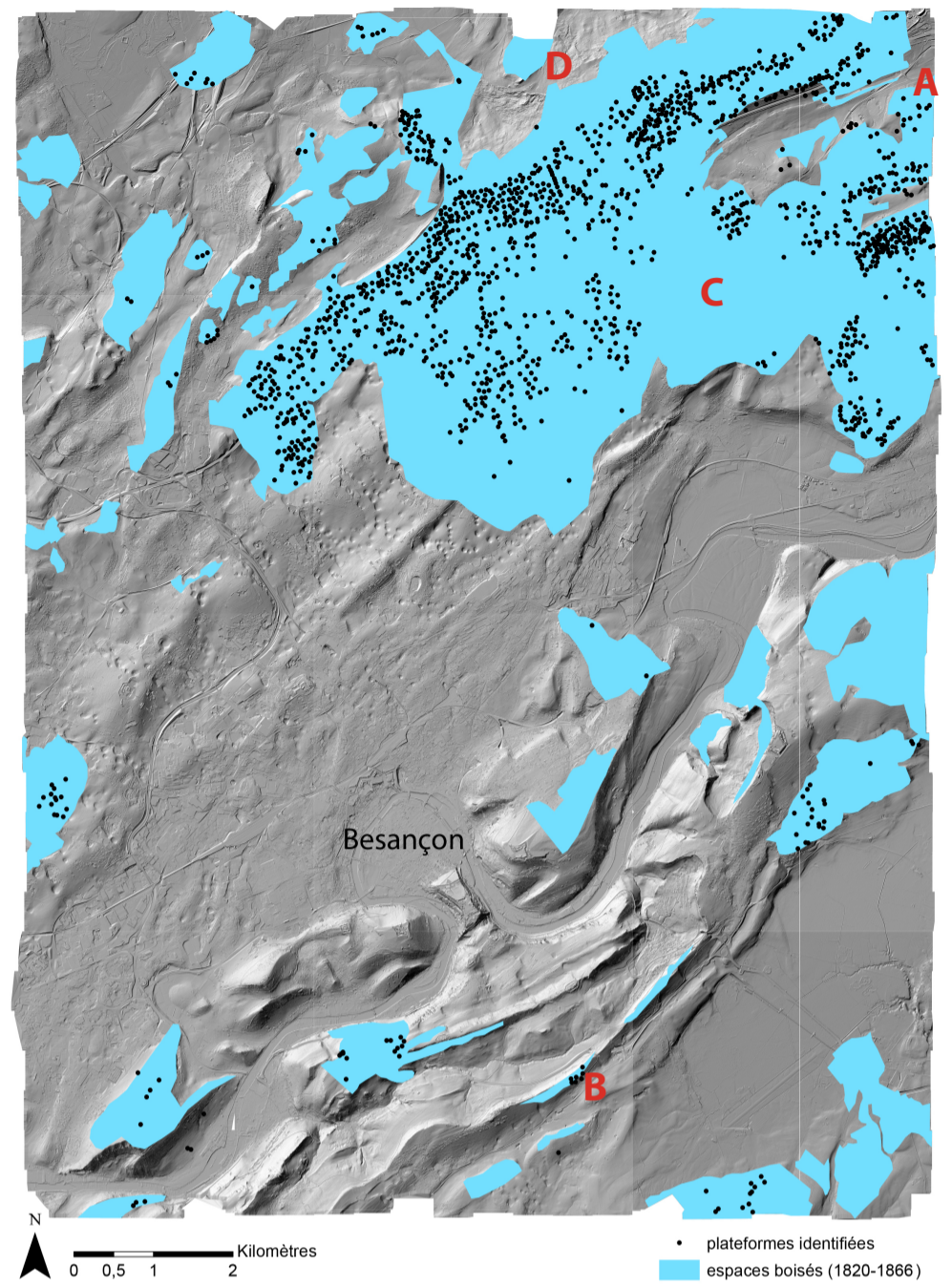
siècles, n'appartenant pas au massif de Chailluz, cette absence de charbonnage peut être expliquée par l'aspect privatif de ces bois. Il faudrait vérifier cette information dans les registres des communes concernées.

Enfin, actuellement la forêt de Chailluz est pour majorité une forêt fermée de futaie de feuillus, avec quelques TSF et quelques taillis épars (**figure 6.2**). Un grand espace a été consacré à l'exploitation de conifères et la zone centrale que nous avons identifiée comme étant une zone à chailles est actuellement gérée en forêt fermée de châtaignier pur. Cette image de la structure forestière actuelle, sensiblement moins riche en taillis, suggère bien une forêt exploitée à d'autres buts que pour le petit bois de chauffage ou pour la production de charbon, mais plutôt pour du bois de qualité, architectural notamment. Les grands consommateurs de bois actuels sont assurément différents de ceux du XVIII^{ème} siècle dont le charbonnage faisait intensément partie.

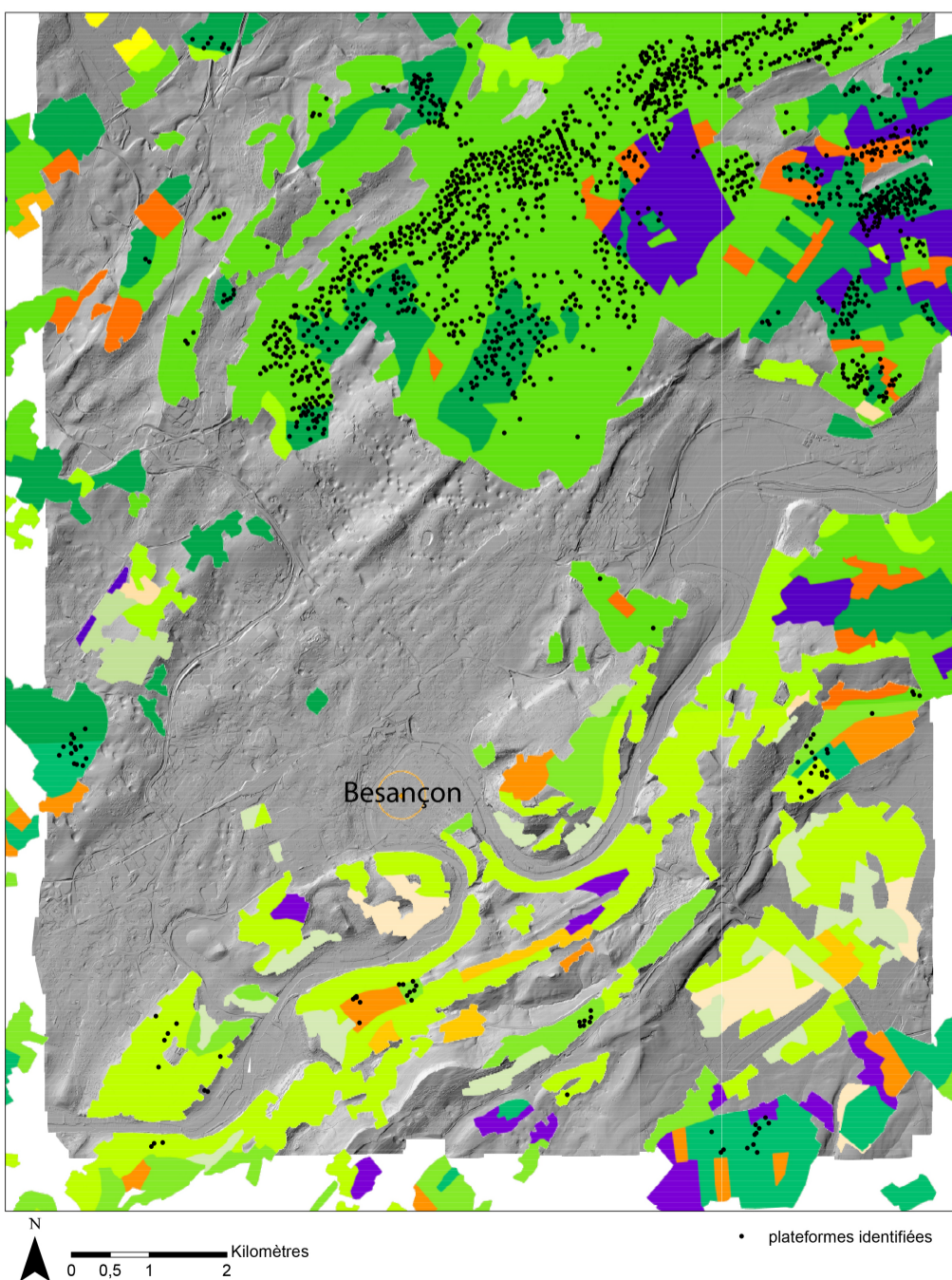
XVIII^{ème} siècle



1820-1866



1987-2006



depuis 2006

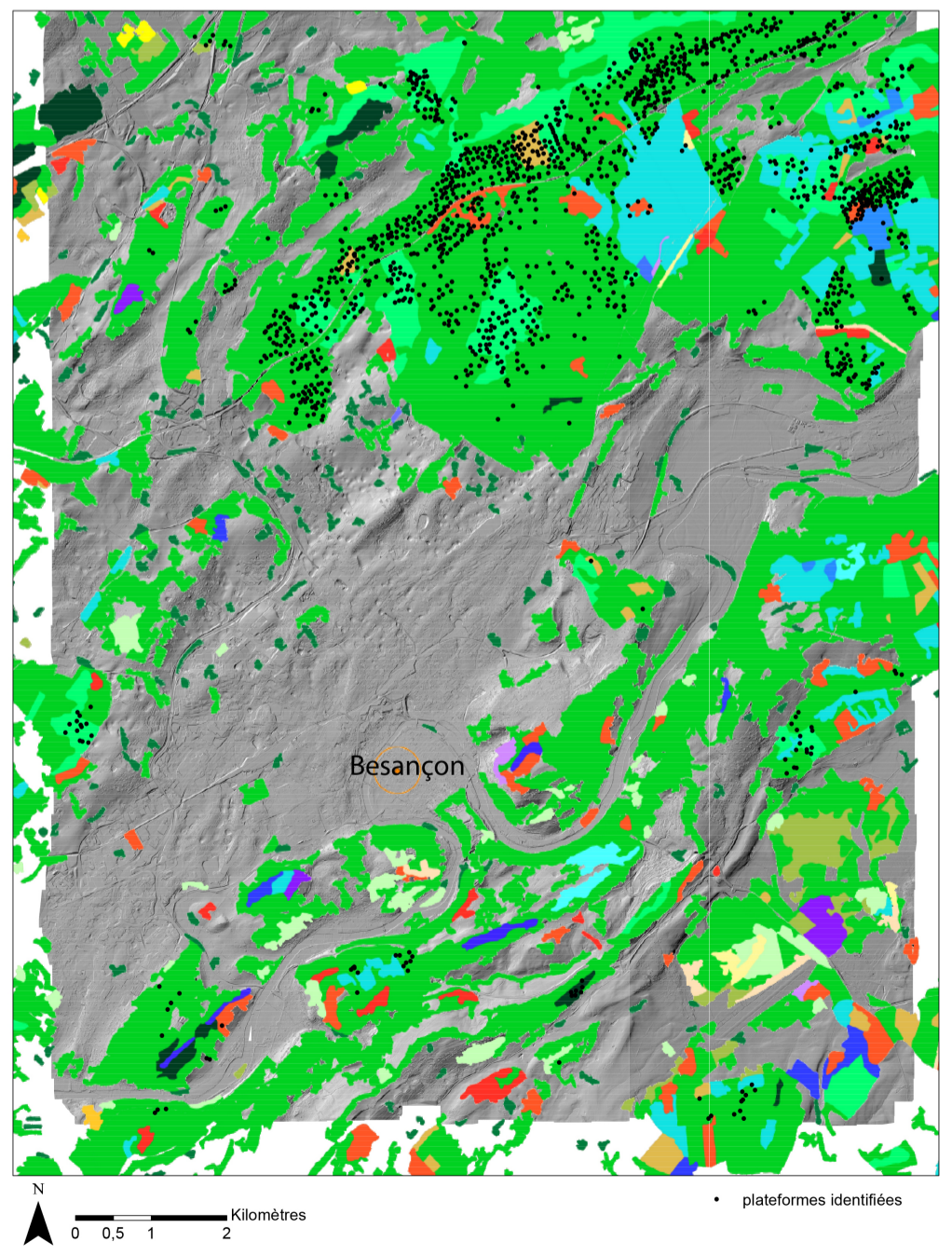


figure 6.3 : Visualisation du couvert forestier sur le territoire bisontin, au cours du temps.
Les plateformes de charbonnage identifiées par prospection LiDAR sont représentées en points noirs.
Les cartes de fond sont le relevé LiDAR acquis par Catherine Fruchart (2014)

Légende de la figure 6.3 :

figure du couvert forestier de 1987-2006

	Futaie de feuillus
	Futaie de conifères
	Futaie mixte
	Mélange de futaie de feuillus et taillis
	Mélange de futaie de conifères et taillis
	Taillis
	Forêt ouverte
	Lande
	Peupleraie

figure du couvert forestier de 2006

	Forêt fermée sans couvert arboré
	Forêt fermée de feuillus purs en îlots
	Forêt fermée de chênes décidus purs
	Forêt fermée de chênes sempervirents purs
	Forêt fermée de hêtre pur
	Forêt fermée de châtaignier pur
	Forêt fermée de robinier pur
	Forêt fermée d'un autre feuillu pur
	Forêt fermée à mélange de feuillus
	Forêt fermée de conifères purs en îlots
	Forêt fermée de pin maritime pur
	Forêt fermée de pin sylvestre pur
	Forêt fermée de pin laricio ou pin noir pur
	Forêt fermée de pin d'Alep pur
	Forêt fermée de pin à crochets ou pin cembro pur
	Forêt fermée d'un autre pin pur
	Forêt fermée à mélange de pins purs
	Forêt fermée de sapin ou épicéa
	Forêt fermée de mélèze pur
	Forêt fermée de douglas pur
	Forêt fermée à mélange d'autres conifères
	Forêt fermée d'un autre conifère pur autre que pin
	Forêt fermée à mélange de conifères
	Forêt fermée à mélange de feuillus prépondérants et conifères
	Forêt fermée à mélange de conifères prépondérants et feuillus
	Forêt ouverte sans couvert arboré
	Forêt ouverte de feuillus purs
	Forêt ouverte de conifères purs
	Forêt ouverte à mélange de feuillus et conifères
	Peupleraie
	Lande
	Formation herbacée

**Annexe 1 : Fonctionnement de la meule traditionnelle
comtoise**

La meule traditionnelle est la technique de fabrication de charbon de bois la plus courante et la plus ancienne en Franche-Comté, et plus largement en France et en Europe. La construction de la meule, décrite par Pline l'Ancien, diffère très peu de celle employée par les charbonniers contemporains. La description qui suit est déduite de la démonstration faite par les charbonniers des baraques du 14 en juillet 2014 et juillet 2015, et du récit d'Albert Lepoivre sur la fabrication du charbon de bois (Lepoivre, 1940).

Dans un premier temps, l'aire de faulde est nivelée de façon à rendre la surface la plus homogène possible. La préparation de la place est cruciale pour la maîtrise de la cuite de la charbonnière. Dans un second temps, les charbonnettes sont disposées verticalement plus ou moins obliquement autour d'une cheminée centrale, faite avec des bois souvent plus courts que les charbonnettes (figure a.57A). Des perches de bois sont préalablement posées au sol, en étoile autour de la cheminée, de telle sorte qu'elles soient retirées une fois la construction terminée, laissant ainsi l'air circuler dans la meule par les événements (figure a.58). Selon la quantité de bois utilisée et le savoir-faire local les étages de charbonnettes sont de deux à quatre. Toujours est-il que les bois du premier étage sont bien souvent biseautés à l'extrémité qui touche le sol, de telle sorte que la circulation d'air soit facilitée au sein du foyer durant la cuisson. Les vides entre les charbonnettes sont comblés par des bois plus courts, et le dernier étage est quasi à plat. L'ensemble ressemble grossièrement à une demi-sphère ou à un cône (figure a.57B). Enfin, l'édifice est recouvert d'une couche de 7 à 8 cm de feuilles, de mousse ou/et de paille, puis d'une couche de terre légère, préférentiellement du frasil (terre récupérée de précédente cuisson de meule), de 8 à 10 cm pour étanchéifier la meule. Dans ces conditions, les entrées d'air sont contrôlées par le charbonnier, via la cheminée qui n'a pas été colmatée par les couches de feuilles et de terre, et les événements aménagés à la base de la meule.

Ce type d'édifice pour la fabrication du charbon de bois nécessite une surveillance méticuleuse et constante de la part du charbonnier. Que ce soit jours ou nuits il doit être attentif aux moindres signes annonçant la perte de contrôle de la carbonisation. En effet, au cours de la cuisson, le bois se contracte entraînant un affaissement de la meule, dont la couverture de terre fissure par endroits. Il est alors nécessaire de vérifier l'étanchéité du four en colmatant ces fissures, afin d'éviter les entrées d'air non désirées. De même, les intempéries jouent énormément sur la conduite de la carbonisation. Le charbonnier doit adapter l'ouverture des événements et de la cheminée en fonction de la force et de la direction du vent. La pluie, elle, détrempe la meule, entraînant un mauvais développement de la carbonisation. La meule traditionnelle exige donc une grande science du métier. « On ne s'improvise pas charbonnier de meule, on le devient après un long apprentissage » (Lepoivre, 1940). L'ultime inconvénient de la fabrication du charbon de bois en meule traditionnelle concerne la propagation de la carbonisation au sein de l'édifice. En effet, se propageant de la cheminée vers la périphérie de la meule (de la zone 1 à la zone 3 sur la figure a.59), la carbonisation est hétérogène au sein de l'édifice et donne donc des charbons de différentes qualités. Les charbons proches de la cheminée ont subi plus longtemps l'action des gaz chauds et sont donc légers et friables. La combustion a été trop avancée. Inversement les charbons de la zone 3 sur la figure a.59 ont carbonisé très lentement et à plus basse température, entraînant un mauvais dégazage et dégoudronnage de ces charbons. Ce sont donc assurément les charbons de la zone 2 qui sont de meilleure qualité, puisqu'ils ont carbonisé à température régulière et moins longtemps que ceux proches de la cheminée.

Ce sont sans doute ces inconvénients et la nécessité de produire vite et bien du charbon de bois qui ont fait choisir le four métallique au détriment de la meule traditionnelle, lors de l'occupation allemande.

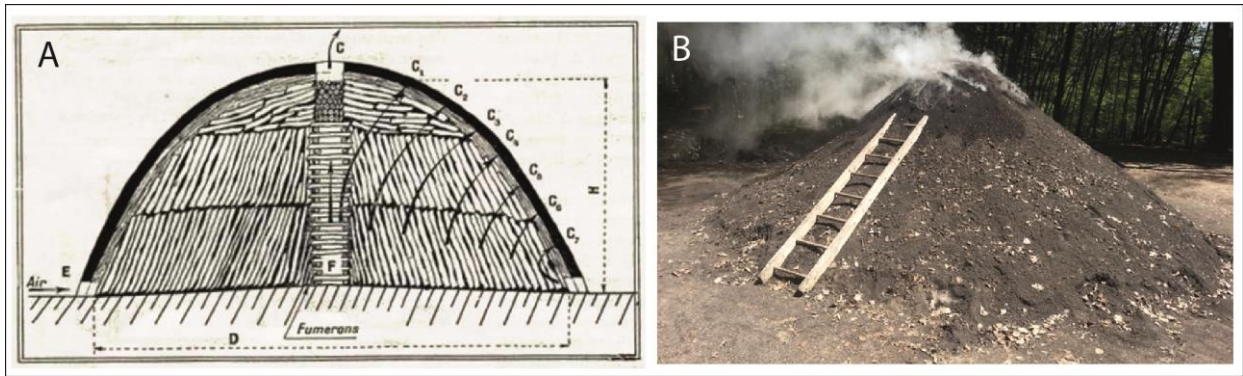


Figure a.3 : La meule traditionnelle. A: Représentation schématique d'une meule vue en coupe verticale (Lepoivre, 1940). B: Photographie d'une meule en fonctionnement en forêt de Chaux (photo: A. Dupin)



Figure a.1 : Mise en évidence des événements lors de la carbonisation d'une meule traditionnelle (flèches noires) (photo: A. Dupin).

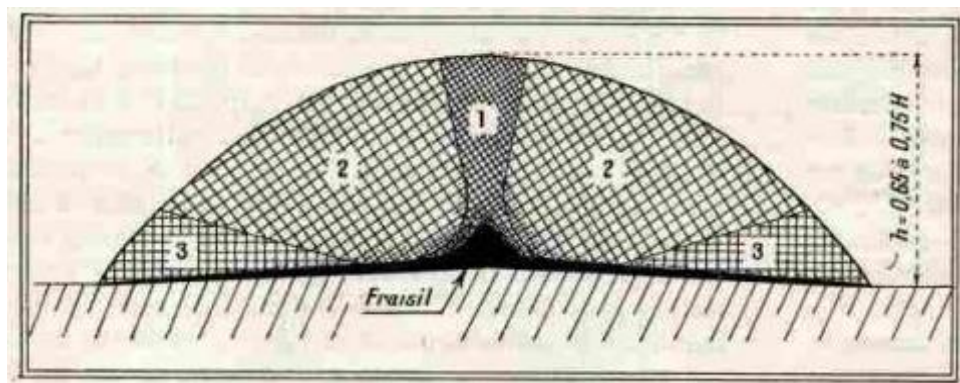


Figure a.2 : Représentation schématique de la propagation de la carbonisation au sein d'une meule traditionnelle (Lepoivre, 1940).

Annexe 2 : Fonctionnement du four métallique utilisé
en Franche-Comté

Concernant la plateforme de charbonnage des fours métalliques, **Romain Rouaud (2013)** a recueilli le témoignage d'un ancien charbonnier dans les gorges du Vianon, affirmant installer ses fours sur les anciennes plateformes de charbonnage, sous-entendu les plateformes utilisées pour la construction des meule traditionnelles.

Tout comme pour la meule traditionnelle, les avantages du four métallique cités ci-dessous, ainsi que la description du four qui s'en suit, sont issus du récit d'**Albert Lepoivre (1941)**, et du témoignage des charbonniers des baraques du 14 en forêt de Chaux.

Les fours métalliques sont en réalité une évolution de la meule traditionnelle, permettant grâce à différents facteurs d'optimiser le rendement d'une cuisson. Les fours ont été conçus de telle sorte qu'ils soient aisément démontables et transportables en forêt, tout en permettant de charbonner une quantité importante de bois. La couverture terreuse de la meule est ici remplacée par une coque de tôle, permettant à la carbonisation d'être indépendante des intempéries, tels que le vent et la pluie. De plus, la conception de ces fours métalliques permet une circulation homogène des gaz chauds et une propagation rapide de la carbonisation au sein de l'édifice. Les charbons obtenus sont alors de qualité plus homogène qu'en meule traditionnelle. Un autre avantage qui découle finalement des précédents concerne le savoir-faire acquis par le charbonnier. Requérant moins d'attention, ou du moins, moins d'expérience qu'en meule traditionnelle, la cuite en four métallique peut fournir du charbon de très bonne qualité même par un charbonnier qui débute son apprentissage. De plus, le revêtement en tôle des fours permet un empilage du bois plus facile et plus rapide qu'en meule traditionnelle, puisqu'il n'y a pas de risque ici de percer la couverture de terre ou encore de faire effondrer la meule. La surveillance de la cuisson est donc réduite. Il n'est plus nécessaire de la surveiller nuit et jour. Enfin, le temps de cuisson est également réduit, passant pour une même masse de bois, de quelques semaines dans une meule charbonnière à quelques jours en four métallique.

Plusieurs modèles de fours métalliques ont été inventés, tous ayant les avantages cités précédemment. Parmi eux, on peut citer les modèles construits par Delhommeau, Trihan, Forindust ou encore Magnein. C'est d'ailleurs les vestiges de ce dernier modèle qui ont été exclusivement retrouvés en forêt du Massif Central (**Rouaud, 2013**), et qui semblent avoir été utilisés en forêt franc-comtoise (**charbonniers des baraques du 14**).

Le four Magnein est composé de trois parties en tôle identifiées sur la **figure a.60**. Au sol, des événements sont aménagés dans la première partie pour la circulation de l'air. La troisième partie est tout simplement le couvercle métallique. Comme pour la meule traditionnelle, une cheminée à section triangulaire ou rectangulaire est dressée au centre du four (**figure a.62B**). Les charbonnettes sont empilées dans le four horizontalement ou verticalement sur un caillebotis reposant sur 8 rondins disposés en étoile autour de la cheminée (**figure a.62B**). Ceci dans le but d'isoler le bois du sol. Une fois le couvercle posé sur l'édifice, les jointures entre les différentes parties sont colmatées par de la terre, dans le but d'étanchéifier le four. Quatre « coude-cheminées » de même hauteur que le four sont alors mis en place entre la première partie et le caillebotis de rondins (**figure a.62A** et **figure a.61**). Quatre « coude-événements » plus courts que les précédents sont intercalés entre les quatre coude-cheminées (**figure a.61**). La base du four est alors étanchéifiée avec de la terre. Ainsi, comme pour la meule traditionnelle, l'allumage de l'édifice se fait par le haut de la cheminée et les entrées d'air sont gérées par les événements et le haut de la charbonnière (**figure a.63**). Le charbonnier peut alors suivre la carbonisation en se fiant aux fumées dégagées par les coudes-cheminées, les événements et la cheminée.

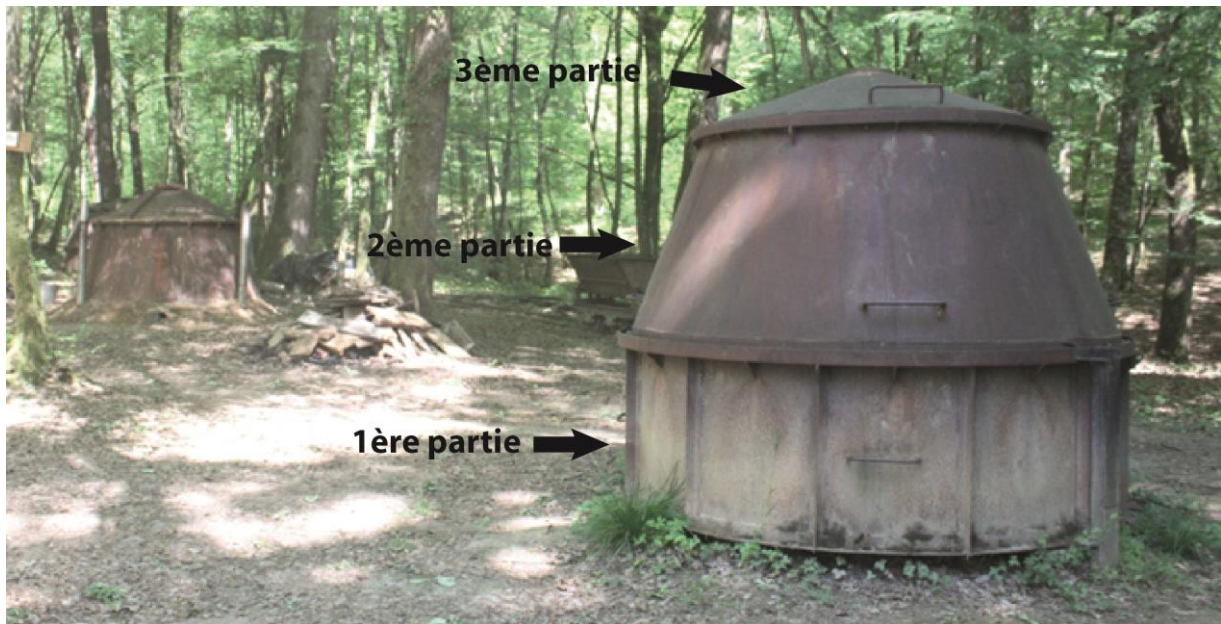


Figure a.4 : Mise en évidence des trois parties métalliques composant un four Magnein.
A l'arrière-plan, un four Magnein est en fonctionnement (photo: A. Dupin)



Figure a.5 : Mise en évidence des coude-évents et des coude-cheminées d'un four Magnein en fonctionnement (photo: A. Dupin)

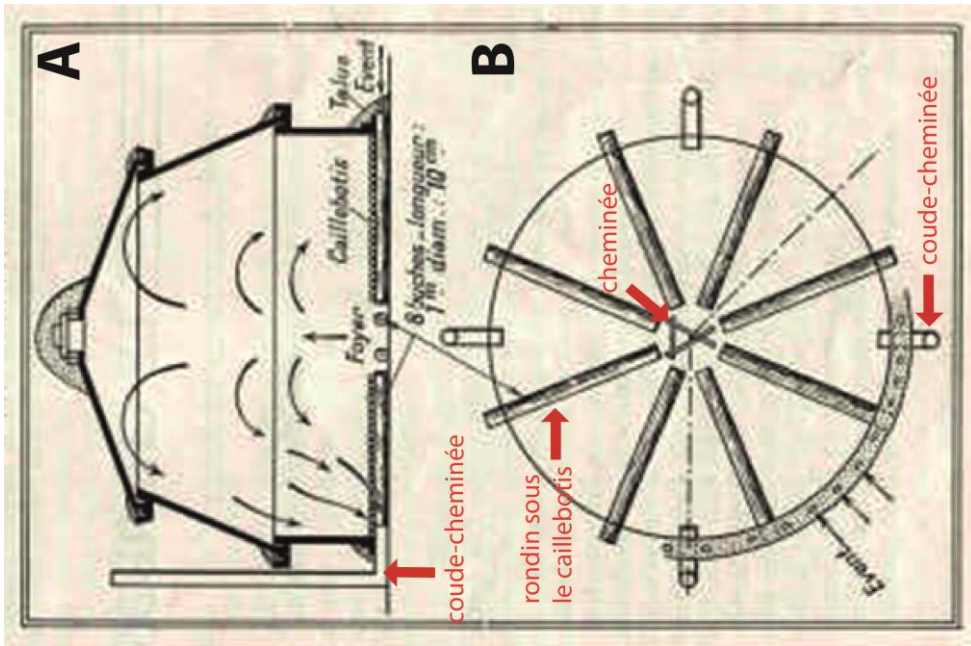


Figure a.6: Représentations schématiques d'un four Magnein. A: Vue en coupe verticale. B: Vue en coupe horizontale (Lepoivre, 1940)



Figure a.7 : Mise en évidence des tirages d'air sur un four Magnein en fonctionnement (flèches noires) (photo: A. Dupin)

**Annexe 3 : AMB traitant de l'exploitation de la forêt de
Chailluz**

En rouge, les AMB traitées durant ce travail de thèse.

quart de réserve	
DD 112	Permission aux vigneron de couper du bois à Chailluz pour la confection d'échalas + règlement des assiettes de Chailluz + opposition du quart de réserve
DD 114	Première exploitation du quart de réserve. 1738-1743
DD 115	Première et seconde exploitation du quart de réserve. 1739-1787
DD 132	négligences des ventes de bois pour le chantier de Battant + difficultés de l'adjudication du quart de réserve (1772-1774)
4M11	vente du quart de réserve + adjudication des travaux (1802-1803) + devis et factures des travaux
EE32	vente du quart de réserve pour la construction des casernes (1738)
EE33	vente quart de réserve pour la construction des casernes et du second pavillon d'officiers (1721-1777)
EE34	vente du quart de réserve pour la construction d'un pavillon d'officiers (1770-1771)
doléances sur le bois (registres de délibérations municipales)	
BB 7	1463-1469 : bois de chauffage + lave issue de Chailluz pour la construction des toits d'églises
BB 9	1491-1510 : droit de récolte du bois mort et du bois vifs
BB 13	1525-1531 : Chailluz en 4 quartiers. 1 quartier pour le bois de chauffage des citoyens. Sauf pomoidées
BB 14	1531-1532 : condamnation des citoyens pour la collecte du bois + autorisation pour la collecte de lave pour la fontaine de Valentin
BB 15	1533-1534 : amendes pour la collecte de bois par les citoyens + les vignes sont dégradées et pas assez de bois
BB 16	
BB 17	1534-1535 : autorisation de récolte du bois pour deux vigneron et pour les citoyens
BB 18	1535-1537 : bois de Chailluz pour les habitants de Besançon: reconstruction de leur maison et bois de chauffage
BB 21	1539-1540 : bois de la cité pour deux tonneliers + bois pour construction d'une maison
BB 24	1544-1546 : amodiation de Chailluz
BB 25	1548-1551 : bois de chauffage + bois pour fours à chaux. Sauf chêne et pomoidées
BB 26	1551-1554 : amodiation de Chailluz + bois pour les vignes
BB 27	1554-1557 : interdiction de faire du bois de marrin à Chailluz + amendes aux vigneron
BB 28	1557-1561 : plaintes contre les habitants de Tallenay + bois pour l'abbé de St-Paul
BB 29	1562-1564 : amodiation de Chailluz + parceaux aux habitants
BB 30	1565-1566 : Amodiation de Chailluz + amendes pour bois pour les vignes et bois de chauffage
BB 32	1569-1570 : bois de chauffage + amende pour récolte du bois + prévention contre les incendies: interdiction de construire des façades en bois
BB 34	1572-1574 : pâture et garde forestier
BB 36	1576-1578 : licenciement de la garnison + arrêtede fournir du bois de chauffage à la garnison + répare les dégâts faits dans les bois de la cité
BB 37	1578-1580 : amodiation de Chailluz + droit de pâture
BB 39	1584-1586 : Plainte contre les habitants de Tallenay

BB 53	1618-1621 : droit d'affouage + un habitant banni pour avoir fait des fourneaux à charbon qui ont mis le feu
BB 54	1621-1624 : bois mort de Chailluz pour tuilier de Chalezeule
BB 59	1630-1631 : interdiction de la production d'écorce de chêne car trop de dégâts à Chailluz
BB 85	1656-1659 : mise en bans d'un tiers de Chailluz car le bois de la cité est en trop mauvais état
BB 92	1667-1668 : bois de flottage + bois aux militaires
BB 96	1674-1676 : bois pour construction des remparts et corps de garde
BB 97	1676-1678 : voitures de bois et de charbon pour le duc de Duras
Plans relatifs à Besançon et ses forêts	
Yc :	Une liste de plans (délimitations, alignements, rues, bâtiments, forêts,...) déposés par le service de la voirie en 1902 aux Archives municipales figure dans la liasse II 18, pièce 10. Ces plans ont été intégrés dans la collection des Dessins Comtois de la Bibliothèque municipale et sont cotés en Yc (P1, P2, M1, M2, G1, G2)
Yc A1 2	Besançon, capitale du Comté de Bourgogne, 1788
Yc A1 3	Plan général des environs de Besançon. 1500-1599
Yc A1 4	Plan des villes et citadelle de Besançon capitale de la Franche-Comté. 1786?
Yc A3 4	Plan géométrique de la forest de Chaillu appartenante à la ville de Besançon. 1721
Yc A3 5	Plan d'un canton apellé Mont de Bregille situé sur le territoire de Besançon. 1738
Yc B5 4	Plan de la partie du côté du quai des Cordeliers (ou côté d'aval) avec le projet d'un arrêt de provision pour arrêter les bois qui pourront échapper des arrêts du port de Rivotte. Non daté
Yc B5 5	Plan de la partie du côté du quai du Saint-Escprit (ou côté d'amont) d'un côté de la Mouillère, avec le projet d'un arrêt de provision pour arrêter les bois qui pourront s'échapper des arrêts du port de Rivotte. Non daté
1G308	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - Palente, Les Quatre-Vents et Montarmots Echelle : 1/5000e -Forêt de <i>Chailluz</i> . 1834
1G309	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - Echelle : 1/500e -Forêt de <i>Chailluz</i> . 1834
1G310	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - Parcelles n°1 à 40 - Echelle : 1/500 -Forêt de <i>Chailluz</i> -Combe Lagasse -RD 7. 1834
1G311	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - parcelles n°41 à 102 - Echelle : 1/1250e -La Banière Plus Haut Que Chez Dormoy -Les Fonds de Chailluz Les Dessus de Chailluz -Grange Vienot Revers du Bas de Chailluz -Le Grand Champ -Devant Chez Ganard -Ferme Dormoy -Revers des Fonds de Chailluz. 1834

1G312	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - parcelles n°103-260 - Echelle : 1/1250e -Les Bas de Chailluz -Barre aux Chevaux -La Carque -Champ Jean Guyez -Champs de l'Epine -Derrière le Verger -La Barre aux Chevaux -Champ du Foyard -Combe Maçon -Le Revers -Au Gros Murger -Champ du Murot -Au Dessus du Revers -Planche Larquey -Carrière Maçon -Champs de la Pointe -Les Coudes Raies - Les Dessus de Chailluz -Les Contours -La Chaille -Le Verger -Ferme Dormoy -Maison de la Barre aux Chevaux -Le Champ Maçon -Le Grand Champ -Champ du Cerisier - Combe vers Chez Dampenon Chemin des Bas de Chailluz Chemin des Dessus de Chailluz. 1834
1G313	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - parcelles n°261 à 423 Echelle : 1/1250e. Le bas de Chailluz. 1834
1G314	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - parcelles n°424 à 548 Echelle : 1/1250e. Chemin des Bas de Chailluz. 1834
1G316	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - parcelles n°780 à 915 Echelle : 1/1250. Chemin du Bas de Chailluz. 1834
1G318	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - parcelles n°1058 à 1159 Echelle : 1/1250e. Les Planche de Chailluz. 1834
1G319	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - Parcelles n°1160 à 1202 Echelle : 1/1250e. Chemin des Bas de Chailluz. 1834
1G320	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - Parcelles n°1203 à 1291 Echelle : 1/1250e -Champs Pourret -A Montarmot -Champs de Grange Borée - Champs Gillet -Champ du Terreau -Au Pavillon -La Combe aux Chiens -Verger Jerusalem -Grange Borée -Verger de La Vigne -Chemin de la Combe aux Chiens - Chemin des Bas de Chailluz à Montarmot -Chemin des Bois de Chailluz -Chemin des Montarmots. 1834
1G321	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - Parcelles n°1292 à 1422 Echelle : 1/1250e -Champs des Bois Borée -Les Appenottes -Les Champs Sauget -Champs Ferroux -Vers chez Les Darlin -Au Verger Beaumet -Grand Champ du Cerisier -Verger Neuf -Chemin des Dessus de <i>Chailluz</i> -Chemin des Montarmots - Chemin des Bois de <i>Chailluz</i> . 1834
1G323	Plan cadastral parcellaire de la commune de Besançon : Section A - Parcelles n°1597 à 1769 Echelle : 1/1250e -Aux Quatre Vents -Aux Combes des Planches -Combe Sarragosse -A La Voirie -Aux Planches de <i>Chailluz</i> -Aux Fougères -Aux Flutttes-Agasse - Sur les Fougères -Aux Champs Passeret -Aux Essarts Munneret du Dessus -Champ du Barlot -Aux Champs du Barlot -Le Barlot -Chemin de Saint-Claude à Palente -Chemin des Planches de <i>Chailluz</i> -Chemin de Vieilley -Chemin des Planches -Chemin de La Voirie. 1834
88W139	Terrains communaux, établissements de servitudes en faveur de particuliers, d'industriels, d'administrations, d'associations et de congrégations religieuses ; location de terrains communaux à des particuliers et des institutions : baux, avenants aux contrats de bail, extraits de délibérations du conseil municipal, correspondance. 1885-1962
8Fi70	Plan de l'ancien Chemin de Marchaux, séparant en cette partie la forêt de Chailluz d'avec le territoire de Thise

3D4	Extraits de plans cadastraux: Chailluz, La Vèze, Bois d'Anglans, Chaudanne, Bregille, Planoise. 1679-1862
5S66	Réalisation d'un levé général avec triangulation : affiche
Forêt de Chailluz, divers	
DD 107	Amodiation par la ville de Besançon des droits de parcours et de glandée dans la forêt (1556-1750)
DD 108	Procès de la ville de Besançon contre la Maîtrise des Forêts qui avait adjugé à un particulier une coupe dans la forêt de Chailluz - Arrêt de la chambre souveraine des Eaux et Forêts du Parlement (1705) reconnaissant à la ville, le droit de propriété sur toute la forêt de Chailluz dans les limites fixées en 1442
DD 109	Procès de la ville de Besançon contre la Maîtrise des Eaux et Forêts de Besançon qui avait fait appel de l'arrêt rendu en 1705 par la chambre souveraine de Eaux et Forêts du Parlement de Besançon - Arrêt des commissaires généraux à la réformation des eaux et forêts du comté de Bourgogne (721) confirmant les droits de propriétés de la ville
DD 111	Enquêtes faites en 1627 dans un procès des habitants de Tallenay et Chatillon le Duc contre Louis de Scey, seigneur de Chevroz au sujet des droits d'usage dans la forêt de Chailluz que les parties se disputaient - Registre des jours locaux de la Gruerie du ressort de Chatillon le Duc (1620-1666)
Fonds général MS 1046. Fol. 16 vo	« Ordonnance sur les amendes de ceulx qui seront trouvez copans ou mésusant ès bois appartenant à la cité. » — « Ordonnance que messieurs particulièrement ne pourront fère aucune grâce ou mutacion de ce que sera esté conclu. » — « Ordonnance desdicts bois de Chailluz et d'Aglant »
DD113	Forêt de la Ville. Juridiction et administration Continuation des démêlés de la ville avec la maîtrise des forêts - Aménagements, tracés de chemin dans les forêts de la ville - Nomination de gardes dans les forêts de <i>Chailluz</i> , d'Aglang, de Bregille, de Chaudanne et de Planoise. 1737-1779
2N9	vente de charbonnettes (1882-1887)
2N16	Délimitation, bornage, exploitation, vente de produits, repeuplement. Plans de recépage. 1743-1814
2N17	Délimitation, vente, exploitation, vente de produits
4N10	Adjudication du produit des terrains communaux : friches, pâturages, herbes, vente de fumier (1791-1946) ; carrières, croisières
2O75	Réouverture d'une carrière à Chailluz : correspondance (1924)
Appartenance de Chailluz et ses limites	
2N46	reconnaissance de limite de la propriété de M. Jullien dans la forêt de Chailluz : délibération du conseil municipal, rapport, plan, correspondance (1885) ; concession de passage dans la forêt de Chailluz accordée aux habitants de Palente : délibération du conseil municipal, convention, rapports, pétition, correspondance (1911).

DD68	Procès entre la Cité de Besançon et la Comté de Bourgogne au sujet des limites du territoire de la Cité : - Enquêtes, dépositions de témoins, nomination de commissaires, décisions souveraines, au sujet de la question des limites séparant le territoire de Besançon des lieux circonvoisins du comté de Bourgogne. Les enquêtes portent sur les limites du territoire du côté de Quingey, Velotte, Saint Ferjeux, Avanne, La Vèze, Thise, Chalezeule et la Forêt de <i>Chailluz</i> (Un inventaire détaillé de pièces concernant le procès des limites a été dressé à la fin du 18° siècle par Belamy, secrétaire de la ville sous le titre "inventaire des titres et papiers concernant les limites du territoire et de sa banlieue ancienne de Besançon, vol,5). 1512-1532
DD78	de titres collationnés pour prouver que le Mont de Pirey, la Bouloye, Montboucon, la Chaille, le Flot, Torcel, <i>Chailluz</i> font partie du territoire et de la banlieue de Besançon. 1533
DD83	Procès des limites entre la Cité de Besançon et la Comté de Bourgogne Production de titres collationnés pour prouver que la forêt de <i>Chailluz</i> est sur le territoire de Besançon et que cette cité y a toujours exercé sa juridiction. 1532-1533
DD85	Procès des limites entre la Cité de Besançon et la Comté de Bourgogne Production de titres collationnés pour prouver que la forêt de <i>Chailluz</i> fait partie du territoire de Besançon et que cette cité y a toujours exercé sa juridiction, ainsi que la forêt du Deffoy appartenant à l'Archevêque. 1533
DD86	Procès des limites entre la Cité de Besançon et la Comté de Bourgogne Production de titres collationnés pour prouver que la forêt de <i>Chailluz</i> fait partie du territoire de Besançon et que cette cité y a toujours exercé sa juridiction. 1533
DD93	Procès des limites entre la Cité de Besançon et la Comté de Bourgogne Production de titres collationnés pour prouver que les forêts de <i>Chailluz</i> et d'Anglans, les cantons de Torcol, Comte du Trumble, Champ de la Chaille, les Escugney, Saint Ferjeux, Champnardin, Brusailles, Sur Biquet, la Combe aux chiens et les Epoisses font partie du territoire et de la banlieue de Besançon. 1558
DD 105	Titres établissant le droit de propriété de la ville de Besançon sur la forêt. - Ancien répertoire des statuts et règlements faits par les gouverneurs de Besançon et comptes des amendes perçues pour les délits dans la forêt de 1390 à 1410. - Déclaration des habitants de Tallenay reconnaissant n'avoir aucun droit d'usage dans la forêt (1330). - Conflit entre la Ville et le Duc Eudes de Bourgogne au sujet de l'installation de fourches patibulaires de la justice de Chatillon dans la forêt de Chailluz. - Procédure commencée en 1390 et relative à cette affaire (DD105 bis : rouleau en parchemin de 88 pieds de roi - 30 mètres). Numérisation partielle. A noter : un inventaire détaillé des titres concernant les forêts appartenant à la ville de Besançon a été dressé à la fin du XVIII par Belamy, secrétaire de la ville, sous le titre Inventaire général des titres qui concernent les forêts appartenant à la ville de Besançon (série II).
DD 106	Titres concernant les droits de propriété de la ville sur la forêt et établissant les limites de celles-ci - Pièces du procès commencé en 1390 entre la Cité et le Duc de Bourgogne, désistement du Duc Jean sans Peur en 1407 - Délimitation contradictoire de la forêt de Chailluz en 1442, - Enquêtes diverses postérieures à ce sujet. - Pièces justificatives diverses des droits souverains de la ville sur la forêt de Chailluz

DD 110	Procès verbaux de délimitation de la partie de la forêt de Chailluz appartenant à la ville de Besançon avec les communes avoisinantes, Tallenay, Chalezeule, Vieilley, Marchaux, Thise, Chatillon le Duc, Bonay, Merey, Braillans (1574-1721)
Exploitation des assiettes à Chailluz (Livrets d'inscription des arrêtés, ordres et procès verbaux relatifs à l'exploitation en régie de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz)	
DD 116	Comptes de l'exploitation en régie de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz et règlement de l'année 1776 relatif à ce genre d'opération
DD 117	assiette de 1763
DD 118	assiette de 1764
DD 120	assiette de 1772
DD 121	assiette de 1773
DD 122	assiette de 1774
DD 123	assiette de 1775
DD 124	assiette de 1776
DD 125	assiette de 1778
DD 126	assiette de 1779
DD 127	assiette de 1780
DD 128	assiette de 1781
DD 129	assiette de 1782
DD 130	assiette de 1783
DD 119	Livrets d'inscription des arrêtés, ordres et procès verbaux relatifs à l'exploitation en régie de l'assiette ordinaire de la forêt de Chailluz (DD,117 à DD,130) : Procès verbaux de reconnaissance et livraison de bois façonnés dans la forêt de Chailluz (1763-1778) et aussi dans les forêts de Bregille et Planoise (1764, 1770 et 1771).
DD 131	Adjudication des coupes ordinaires et des arbres abattus par accident
Bois de chauffage et bois flotté	
DD 138	Edits municipaux réglementant le mesurage et le prix de la vente du bois amené sur le Port de Rivotte pour l'approvisionnement des citoyens de Besançon - Poursuites contre les marchands en contravention avec ces règlements - Entretien des arrêts du Port Rivotte pour retenir les bois flottés - Autorisations accordées aux flotteurs de bois de marine d'abaisser momentanément ces arrêts
DD 139	Difficultés entre la ville de Besançon et les Officiers de la maîtrise des eaux et forêts relativement à l'approvisionnement du bois de chauffage pour les citoyens et la garnison - Arrêts et ordonnances levant les obstacles apportés par l'administration forestière à l'exécution des lettres patentes du 17 octobre 1735
DD 140	Arrêt préparatoire du 29 septembre 1722 et lettres patentes du 17 octobre 1735 affectant au chauffage des citoyens et de la garnison de Besançon la totalité du produit des forêts situées à la distance de moins d'une lieue du lit du Doubs et des cours d'eau y affluent - Plan général des bois situés à proximité du Doubs dressé par Carpentier et Ferret
DD 141	"Etat des bois affectés au chauffage de la ville de Besançon la maîtrise de la même ville par lettres patentes du 17 octobre 1735"

DD 142	Procès-verbaux de l'inspection annuelle faite par les commissaires de la municipalité de Besançon sur les cantons de bois affectés à son chauffage par les lettres patentes de 1735
DD 143	Règlements municipaux pour la police du bois de chauffage destiné à la ville de Besançon - Reconnaissance de l'état des cours d'eau du Doubs et de ses affluents relativement au flottage - Demandes faites par les fournisseurs du bois de la ville et de la garnison pour obtenir à tour de rôle les eaux du Doubs à l'effet d'y faire flotter leurs bois
DD 144	Etats des bois vendus dans les ressorts des maîtrises forestières de Baume et Vesoul remis à la ville en vertu du privilège qu'elle avait pour son chauffage sur certains bois situés dans ces ressorts - Marchés et comptes relatifs à l'achat, l'exploitation et au débit des coupes de bois achetées par la ville pour l'usage de la garnison et des citoyens, dans la forêt de Franquemont, faisant partie du domaine du Comte de Montbéliard, et dans celle de Goumois dépendant de la seigneurie de Monjoye
DD 145	Mémoires, ordonnances et arrêts au sujet des prestations des fermiers généraux de faire payer la taxe ordinaire aux bois destinés à la ville de Besançon provenant d'Alsace ou ayant flotté sur la portion de la rivière du Doubs comprise dans cette province - Correspondance avec le conseil d'Etat de Montbéliard et avec celui de l'Evêché de Bâle relativement aux autorisations de faire flotter, sur la portion du Doubs comprise dans ces deux principautés, le bois destiné à la ville de Besançon - Réparations des dommages causés aux écluses des moulins et usines de ces deux pays par les flottées de bois lancées pour le compte de la ville
DD 146	Réquisitions annuelles pour le bois que la ville devait fournir au Parlement
DD 147	Arrêts et ordonnances imposant l'obligation d'ouvrir dans tous les barrages du Doubs, des portières pour laisser passer le bois de chauffage flotté ainsi que les bois destinés au service de la marine - Construction de portières à l'écluse du moulin de la ville (1731-1789) - Ordonnances municipales taxant les bois flottés par les différents adjudicataires des coupes de forêts situées dans le périmètre forestier affecté au chauffage de la ville de Besançon (1771-1773) - Procès soutenu par la ville de Besançon contre certains adjudicataires de coupes de bois situées dans le périmètre des forêts affectées au chauffage de la ville (1776-1777)
Port au bois, flottage du bois	
DD 148	Règlements pour la police du Port au bois ; marchés et plans pour la construction et l'entretien des arrêts destinés à retirer le bois flotté, aménagements des chantiers pour empiler le bois et des locaux pour remiser les agrès du port
DD 149	Procès intentés par la ville de Besançon, devant l'Intendance, aux entrepreneurs de la conduite de bois de marine, en raison des dépôts commis aux arrêts du Port Rivotte, au pont de Bregille, à l'écluse du moulin de la ville, par des pièces de bois que l'on avait imprudemment fait flotter à bûches perdues (1739-170) - Vol de bois flotté sur le Doubs au préjudice de deux marchands ayant entrepôt au Port Rivotte : procès plaidé devant le tribunal de police de l'Hôtel de ville (1743)
DD 150	Poursuites exercées par la ville contre des marchands, ayant converti en charbon destiné aux forges, des coupes de bois affectées au chauffage des citoyens et de la garnison de Besançon - Transaction entre la ville et les délinquants . 1768-1785

DD 151	Arrêts et sentences règlementant les droits de l'Archevêque sur les bois arrivant au Port Rivotte par la rivière du Doubs : 1° une fascine par chaque propriétaire de tout train de bois gros ou menu. 2° la 160° partie de tout bois flotté à bûches séparées ou perdues
DD 152, DD 153, DD 154	Procès soutenu par la ville contre l'Archevêque réclamant d'avoir part aux droits perçus sur le bois de chauffage amené par le Doubs au Port Rivotte - Pièces du procès devant les parlements de Besançon et de Grenoble et devant le Conseil d'Etat - Arrêt du Conseil d'Etat (12 mars 1698) reconnaissant à l'Archevêque le droit de percevoir une fascine par radeau de bois arrivant au port Rivotte et appartenant à un seul propriétaire, autant de fascines que de propriétaires sur chaque radeau appartenant à plusieurs individus
DD 193	Registre de perception des droits dits "des Blancs du port", sur les bois arrivant par le Doubs au Port de Rivotte, avec indication du nom de ceux qui amènent les dits bois.
chauffage par tourbe	
DD 155	Tourbières des marais de Saône. Arrêt du Conseil d'Etat accordant, dans l'intérêt du chauffage de la ville de Besançon, un privilège d'exploitation de trente années au nommé Rochejean, inventeur des tourbières du marais de Saône - Opposition des habitants de Morre à ce privilège, en ce qui concernait leur territoire. 1732-1735
forges en Franche-Comté	
DD 156	Lettres et mémoires touchant les oppositions formées par la municipalité de Besançon à l'établissement de nouvelles forges et autres usines pouvant consommer le bois des forêts privilégiées par le chauffage de la ville de Besançon : Forges de Bremondans (1720), de Sancey (1723), de Pont de Roide (1730), de Vercel (1731), de Frontenay (1777), de la verrerie près de la Grâce Dieu (1721) nb : A la suite d'un mémoire de la municipalité contre M, de Vercel (f° 33) se trouve un " Etat des forges et fourneaux de Franche Comté " (1731)

Requêtes des particuliers pour reconstruction de leur maisons. Démolition et construction d'édifices	
Les dossiers DD1 à DD65 concernent les demandes d'autorisation d'urbanisme faites par des habitants de Besançon pour construire, agrandir ou modifier leur habitations. Le contrôleur de la Ville effectue alors une visite sur place et vérifie que le projet respecte la réglementation : il établit alors une reconnaissance ou émet des observations. Ces demandes sont parfois accompagnées d'un plan des travaux envisagés. Elles concernent principalement le XVIIIème siècle.	
DD1-11	Bannière Saint-Quentin
DD12	territoire de la Vèze
DD13-20	Bannière de Saint Pierre
DD21-28	Bannière du Bourg
DD29-48 + DD41bis	Bannière de Chamars
DD49-56 + DD62-63	Bannière Battant
DD57-60	Bannière de Charmont
DD61 + DD64-65	Bannière d'Arènes
DD66-67	Requêtes des particuliers de Besançon et de sa banlieue demandant diverses constructions ou réparation à leurs immeubles et clôtures, notamment la pose d'enseignes indiquant leur art ou métier ; reconnaissance du contrôleur de la ville

Sources et bibliographie

Lepoivre, A., 1941. Le charbon de bois (suite). La Nature 3065.

Lepoivre, A., 1940. Le charbon de bois. La Nature 3064, 1–35.

Rouaud, R., 2013. Les forêts de pente de la haute vallée de la Dordogne : enjeux écologiques et énergétiques (PhD thesis). Université de Limoges.

Mots clés : Charbonnières, Franche-Comté, époque moderne, anthracologie

Résumé : La forêt franc-comtoise, en particulier la forêt bisontine, a lourdement souffert de son exploitation au cours des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles, entraînant une pénurie de bois sur le territoire bisontin. Dans de nombreuses sources historiographiques et travaux de recherche, les raisons de cette pénurie apparaissent comme étant complexes et multiples. La découverte de près d'un millier de plateformes de charbonnage en forêt de Chailluz a induit toute une série de questionnements concernant la fonction de cette forêt et le rôle du charbonnage dans la pénurie de bois bisontine.

Les prémices d'une étude archivistique ont permis d'identifier et de caractériser les grands consommateurs du bois du territoire bisontin durant les XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles autres que l'activité charbonnière qui est très rarement citée dans les textes. L'étude archéométrique des plateformes de la forêt de Chailluz a permis de caractériser le charbonnage de la fin de l'époque moderne, fournissant alors l'image des peuplements forestiers du XVIII^{ème} siècle ainsi que l'impact de cette pratique sur cette forêt.

Keywords : Charcoal kilns, Franche-Comté, modern period, anthracologie

Abstract : The Franche-Comté forest, in particular the forest of Besançon, suffered heavily from its exploitation during the 18th and 19th centuries, causing a wood shortage in the territory. In many historiographical sources and research, the reasons of this shortage appear to be complex and manifold. The discovery of nearly a thousand charcoal platforms in the Chailluz forest has led to a series of questions concerning the function of this forest and the role of charcoal production in the wood shortage.

The first fruits of an archival study made it possible to identify and characterize the major consumers of wood in the territory of Besançon during the 18th and 19th centuries other than the charcoal production which is rarely mentioned in the literature. The archaeometric study of the Chailluz charcoal platforms made it possible to characterize the charcoal production at the end of the modern age, providing the image of the 18th century forest stands and the impact of this practice on Chailluz.