



HAL
open science

Approche expérimentale de la conservation des charbons de bois dans les gisements paléolithiques : processus post-dépositionnels, fragmentation et représentativité des assemblages anthracologiques

Julia Chrzavzez

► To cite this version:

Julia Chrzavzez. Approche expérimentale de la conservation des charbons de bois dans les gisements paléolithiques : processus post-dépositionnels, fragmentation et représentativité des assemblages anthracologiques. Archéologie et Préhistoire. Université Nice Sophia Antipolis, 2013. Français. NNT : 2013NICE2029 . tel-00948324

HAL Id: tel-00948324

<https://theses.hal.science/tel-00948324>

Submitted on 18 Feb 2014

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.

UNIVERSITÉ DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS
UFR Lettres, Arts, Sciences Humaines et Sociales
UMR 7264 CEPAM-CNRS

THÈSE DE DOCTORAT

MENTION : HISTOIRE ET ARCHEOLOGIE ; SPÉCIALITÉ : ANTHRACOLOGIE
École doctorale Lettres, Sciences Humaines et Sociales

Présentée et soutenue publiquement par

Julia CHRZAVZEZ

le 5 novembre 2013

**APPROCHE EXPÉRIMENTALE DE LA CONSERVATION DES
CHARBONS DE BOIS DANS LES GISEMENTS
PALÉOLITHIQUES :
PROCESSUS POST-DÉPOSITIONNELS, FRAGMENTATION ET
REPRÉSENTATIVITÉ DES ASSEMBLAGES ANTHRACOLOGIQUES**

Sous la direction de Liliane MEIGNEN et le tutorat d'Isabelle THÉRY-PARISOT

Devant un jury composé de :

Mme. Ernestina BADAL-GARCIA, Professeur à l'Université de Valencia	Rapporteur
M. Jean-philippe BRUGAL, Directeur de Recherches au CNRS (UMR 7269)	Rapporteur
Mme. Lucie CHABAL, Chargée de Recherches au CNRS (UMR 5059)	Examineur
M. Pascal DEPAEPE, Directeur Scientifique et Technique de l'INRAP	Examineur
Mme. Liliane MEIGNEN, Directeur de Recherches au CNRS (UMR 7264)	Directeur
Mme. Isabelle THÉRY-PARISOT, Directeur de Recherches au CNRS (UMR 7264)	Tuteur

REMERCIEMENTS

Parvenue au terme du « parcours initiatique » que peut constituer l'aboutissement d'un travail de thèse, il me plait de pouvoir, par ces quelques lignes, remercier les nombreuses personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Ernestina Badal-Garcia et Jean-Philippe Brugal, rapporteurs, et Lucie Chabal et Pascal Depaepe, examinateurs, ont bien voulu offrir un peu de leur temps à l'appréciation de ce mémoire, je les en remercie sincèrement.

Liliane Meignen a dirigé ce travail et m'a témoigné une confiance sans faille. Pour sa bienveillance et toutes les discussions éclairantes que nous avons pu avoir, pour ses relectures minutieuses et sa gestion efficace de la « chose » administrative, notamment dans les derniers instants de cette thèse... pour tout cela et bien plus encore. Merci.

Isabelle Théry-Parisot, en acceptant de me suivre en Master II, m'a ouvert tout un monde. Je suis heureuse qu'elle ait bien voulu récidiver en me confiant ce sujet de thèse. La confiance qu'elle m'a accordée, sa disponibilité, son énergie débordante... ou plus simplement, sa générosité dans le travail, m'ont été d'une aide précieuse. Je l'en remercie et j'espère que ce mémoire, bien que nécessairement différent, est à la hauteur de ses attentes.

Merci à Didier Binder, puis Martine Regert, successivement directeurs du CEPAM, de m'avoir accueillie au sein du laboratoire et m'avoir permis de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions.

Les tests de compressions mécaniques ont été réalisés dans le cadre d'une convention entre le CEMEF (Centre de mise en forme des matériaux, Mines Paristech, Sophia-Antipolis) et le CEPAM. Je remercie tout particulièrement Gibert Fiorucci qui a supervisé les essais, qui m'a toujours si bien reçue et conseillée et n'a jamais eu l'air de trouver bizarre de porter un si grand intérêt aux charbons de bois !

Une partie des compressions ont été effectuées par Alexandre Ducom dans le cadre d'un stage de fin d'étude de l'École Polytechnique, au cours duquel il a également écrit les deux macros d'analyse d'image utilisées dans ce travail. Merci pour sa contribution.

Les images MEB qui ont servi aux mesures de porosité ont été obtenues au CEMEF grâce au concours de Suzanne Jacomet qui nous reçoit avec amabilité et bonne humeur, sans ménager son temps. Je lui en suis grandement reconnaissante.

Dans la dernière phase d'analyse de la donnée, Bernard Thibaut du LMGC (Laboratoire de Mécanique et Génie Civil de Montpellier) et Jean-Frédéric Terral ont accepté de relire mon travail. La contribution de Bernard Thibaut a permis, pour les aspects relatifs à la caractérisation des propriétés mécaniques des charbons de bois, d'atteindre une plus grande rigueur. Cette partie a été grandement enrichie par leurs apports, je les remercie sincèrement l'un et l'autre.

Pascal Bertran m'a initiée aux joies du périglaciaire. Ma participation aux dernières années du « Programme Gavarnie » qu'il a dirigé entre 2003 et 2008 a permis l'obtention de résultats déterminants pour l'avancée de ce travail. Merci d'avoir accepté d'accueillir, entre os et silex, quelques charbons de bois ; de m'avoir laissé entrevoir l'incroyable richesse de la géomorphologie périglaciaire ; de posséder un tel savoir et de le partager si simplement.

Faire l'ascension des Pyrénées avec une station météo dans le sac à dos pour aller chercher des os, silex et charbons que l'on a soi-même déposés est une curieuse lubie des archéologues... il faut sans doute être un peu fou et c'est ça qui est bon... merci aux membres de l'équipe et en particulier à Véronique Laroulandie, Arnaud Lenoble, Cédric Beauval, Stéphane Boulogne, Jean-Baptiste Mallye, Sandrine Costamagno, Thierry Feuillet, Philippe Malaurent, Dominique Todisco, d'avoir fait que ces missions annuelles soient en plus d'excellents moments.

À Castanet, nos charbons ont également été généreusement accueillis. Je remercie à cet égard Randall White, Laurent Chiotti, Catherine Cretin et Sandrine Costamagno. Lors de mon passage pour le démontage des cellules, Catherine Cretin et sa famille m'ont royalement reçue et hébergée ; Randal White et Isabelle Castanet ont été d'une gentillesse remarquable. Ce « pèlerinage » en Dordogne préhistorique (et gastronomique !) m'a laissé un grand souvenir. Merci à eux.

Les essais de météorisation ont été réalisés grâce au concours de Météo France et en particulier à Alain Del qui a accepté de me recevoir, m'a consacré du temps et a permis le dépôt des charbons de bois à Levens et Sophia-Antipolis. Francis Torre en charge de l'entretien des stations au sein du Conseil Général des Alpes Maritimes m'a accompagnée à chaque fois que j'en ai eu besoin. Il a lui aussi fait preuve d'une grande bienveillance et de beaucoup de disponibilité. Les enregistrements thermiques et pluviométriques nous ont été fournis par Pierre Carrega, en charge de la convention avec Météo France au sein de l'Université de Nice Sophia Antipolis, et Cyriel Adnes, tous deux membres de l'UMR ESPACE. À tous, merci pour leur collaboration.

Les expériences de gel-dégel et de retrait-gonflement ont été mises en œuvre à partir d'un sédiment que nous a confié Michel Dubar. Il a également réalisé les mesures des teneurs en carbonates, sables, limons et argiles. De même, le test de pH a bénéficié du concours de Michel Girard qui nous a conseillée et fourni le matériel et les produits nécessaires. D'une manière générale, tous deux ont toujours fait preuve de beaucoup de disponibilité à l'égard des doctorants qui n'ont de cesse de les questionner sur mille sujets. Je me joins à mes pairs pour les en remercier.

L'expérience de piétinement mise en œuvre au CEPAM a vu la contribution d'une partie des doctorants d'alors et en particulier Auréade Henry, Nicolas Bernigaud et Hutangkura Trongjai dit « Khun »... la fragmentation observée leur est due ! Merci d'avoir consacré ce temps précieux, prélevé sur vos thèses respectives, de m'avoir assistée pour le prélèvement et le remballage avant qu'il fasse nuit noire... ! Ce jour-là, comme tant d'autres, fût de ceux où travailler est un plaisir.

Je ne peux manquer de remercier Jacques-Éli Brochier et Michel Livache pour m'avoir encouragée, aidée et suivie avec intérêt depuis ma maîtrise. Ma reconnaissance va également à Marco Peresani, Ludovic Slimak et Damien Pesesse pour m'avoir confié le matériel anthracologique issu de leurs fouilles.

À de nombreuses reprises au cours de ces années de thèse, les personnels ITA et BIATOSS du laboratoire m'ont été d'un grand secours. D'une manière générale, je tiens à rendre hommage à tous les techniciens et personnels administratifs des laboratoires, si précieux pour l'activité de recherche. Au CEPAM, je remercie tout particulièrement Alain Carré, Arnaud Jouvenez, Sabine Sorin, Antoine Pasqualini, Arnaud Mazuy, Janine François, Myriam Benou, Monique Oger, Dominique Trousson, Vanessa renaudin et Jean-Denys Strich. Merci à eux de traiter si bien les doctorants, nous sommes bien chanceux de vous avoir !

Depuis deux ans que j'ai été embauchée bien loin du CEPAM, mes passages dans les Alpes-Maritimes sont « SDF ». Pas mal de gens, en m'hébergeant, ont très concrètement contribué à l'aboutissement de ce travail. Je les en remercie tous sincèrement, et plus particulièrement Isabelle Rodet-Belarbi, Fabrice, Naima et Sarah Belarbi, qui m'ont logée pendant tous les mois qu'a duré ma « mise en dispo rédactionnelle ». Leur générosité spontanée est précieuse et rare... merci !

ArchéoLoire m'a libérée quelques temps pour avancer la rédaction de cette thèse. Je suis reconnaissante à ceux qui l'ont permis et en particulier à Justine Vorenger qui a assumé pendant cette période une partie de mes tâches. J'espère pouvoir lui rendre la pareille. D'une manière générale je remercie les collègues qui m'ont soutenue (avec une dédicace particulière à Sita et Béa !).

Je ne peux remercier nommément tous les membres du CEPAM, mais j'ai passé parmi vous tous de riches et belles années... Merci à tous !

J'ai une pensée spéciale pour tous les amis doctorants (-teurs), du CEPAM, mais aussi des autres laboratoires de la MSH, car, que serait la thèse sans ce lien si particulier qui nous rassemble ?!... Pour tous les moments passés ensemble, dans tous nos états, de la joie à la détresse... merci à Auréade, Sébastien, Lorraine, Nico, Greg, Louise, Justine, Élixa, Khun, Carmine, Cédric, Laura, Hala, Jean-Victor, Maxime, Thomas, Aurélie, Antonin, Carolle, Émilie, Gaëlle, Fadi, Monder, Janet, Cristina, Léonor, mais aussi les docs psycho et socio, Ophélie, Vincent, Céline, Ryzlène, Eva, Zaineb, Olivier, Alex, Marion, et j'en oublie sans doute... Merci à vous tous... Quelle tribu nous avons formé !

Enfin, je remercie mes proches d'être là, de m'avoir toujours soutenue et encouragée. Mes amies de toujours, mes « essentielles »... Amanda, Aurélie, Aurore, Élise, Julie, Marina. Et, plus récemment, Julienne et Béatrice. Mes amis Richard, Benoît et Diego. Mon frère Samuel. Ma marraine Dominique. Ma mère, Anne-Marie, mon père, René, et mon beau-père, Achim. Mes grands-parents qui ont tant compté.

Merci à mes parents de m'avoir toujours fait confiance, de m'avoir encouragée à suivre mon propre chemin, c'est une chance et une aide inestimable, cela m'a toujours portée.

Merci à Julia Regis sans qui cette thèse n'aurait peut-être jamais vu le jour.

Je suis fière d'avoir gagné la bataille. Maintenant, tout est devant...

« Bi kashtesko merel i yag »

Sans bois, le feu meurt...

Proverbe Rom Lovara,

Tsiganes, Jan Yoors, 1967 [2011], p. 65

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
I. L'approche taphonomique en archéologie.....	1
II. Anthracologie et taphonomie.....	3
III. Fragmentation des charbons de bois et représentativité des assemblages anthracologiques....	5
IV. Entre évidences archéologiques et taphonomie : la question de l'origine et de l'utilisation du feu par les sociétés préhistoriques	7
V. Vers une approche expérimentale de l'impact des processus post-dépositionnels sur les assemblages anthracologiques	10
CHAPITRE I :	
LA CONSERVATION DES CHARBONS DE BOIS DANS LES GISEMENTS PALEOLITHIQUES : APPROCHE THÉORIQUE ET SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES.....	15
Introduction.....	16
I. ABONDANCE, INDIGENCE OU ABSENCE DES CHARBONS DE BOIS DANS LES GISEMENTS PALÉOLITHIQUES : LES FACTEURS MULTIPLES D'UNE RÉALITÉ ARCHÉOLOGIQUE HÉTÉROGÈNE	16
I.1. Genèse du dépôt anthracologique.....	16
I.1.1. À l'origine du dépôt anthracologique : l'utilisation du feu et la gestion des combustibles au Paléolithique	16
I.1.2. Le processus de combustion : étape constitutive du dépôt anthracologique	22
I.1.3. Les conditions de la conservation du dépôt anthracologique	24
I.1.4. Le dépôt anthracologique, résultat de l'interaction de facteurs multiples	27
I.2. L'observation archéologique.....	29
I.2.1. La reconnaissance des facteurs influents en contexte archéologique.....	29
I.2.2. Variabilité de la conservation des charbons de bois dans les gisements du Paléolithique : quelques exemples.....	31
I.2.3. Récurrence des processus, récurrence des effets ?.....	37
II. IMPACT DES PROCESSUS POST-DÉPOSITIONNELS SUR LES CHARBONS DE BOIS, ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	39
II.1. Bioturbations	39
II.2. Transport par l'eau et le vent.....	41
II.3. Structure du charbon de bois et altérations diagénétiques et biologiques	43
II.4. Les processus induisant des phénomènes de compression	45
Conclusion du chapitre I.....	50

CHAPITRE II :

OUTILS ET PRINCIPES MÉTHOLOGIQUES RETENUS POUR L'ÉTUDE DE L'IMPACT DES PROCESSUS POST-DÉPOSITIONNELS SUR LES ASSEMBLAGES ANTHRACOLOGIQUES	53
Introduction.....	54
I. L'APPROCHE EXPÉRIMENTALE	54
I.1. Le choix de l'expérimentation	54
I.2. Provenance des lots de bois	56
I.3. Combustions et préparation des échantillons expérimentaux	57
II. L'ANALYSE D'IMAGE	59
II.1. Comptage des fragments	59
II.2. Mesure de la porosité	60
III. L'ANALYSE STATISTIQUE	61
III.1. Tests paramétriques	62
III.2. Tests non paramétriques	65
III.3. Puissance d'un test	67
III.4. Analyses multifactorielles	68

CHAPITRE III :

CARACTÉRISATION DU « MATÉRIAU CHARBON DE BOIS » : PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET FRAGMENTATION	71
Introduction.....	72
I. Le charbon de bois comme matériau : généralités	73
I.1. Le matériau bois	73
I.1.1. Structure anatomique du bois.....	73
I.1.2. Composition du bois.....	75
I.1.2.1. Composition élémentaire.....	75
I.1.2.2. Constituants organiques	75
I.1.2.3. Teneur en eau	76
I.1.3. Propriétés du bois.....	76
I.2. Du bois au charbon de bois	77
I.2.1. La carbonisation	77
I.2.2. Composition physico-chimique du charbon de bois	78
II. Caractérisation des propriétés mécaniques du charbon de bois : approche expérimentale	79
II.1. Matériel et méthode	79
II.1.1. Fabrication des échantillons.....	80
II.1.2. Température de carbonisation.....	80
II.1.3. Mesure de la porosité	81
II.1.4. Tests de compression	81

II.1.5.	Construction de la base de données	83
II.2.	Résultats	85
II.2.1.	Valeurs brutes moyennes.....	85
II.2.2.	Propriétés physiques et mécaniques	86
II.2.2.1.	Masse, volume et masse volumique.....	86
II.2.2.2.	Contrainte à la rupture, module et déformation d'écrasement.....	87
II.2.2.3.	Résistance spécifique	90
II.2.2.4.	Propriétés mécaniques et perte de masse volumique	91
II.2.3.	Fragmentation	92
II.2.3.1.	Nombre total de fragments	92
II.2.3.2.	Modalités de la fragmentation	96
II.2.3.3.	Liens entre propriétés mécaniques et fragmentation	100
II.3.	Analyse et interprétation	101
II.3.1.	Synthèse des résultats.....	101
II.3.2.	Caractéristiques spécifiques et comportement mécanique : analyse multifactorielle	102
II.3.3.	Interprétation	104
II.3.3.1.	Facteurs incidents sur la fragmentation	104
II.3.3.2.	Facteurs incidents sur le seuil d'élasticité.....	104
II.3.3.3.	À propos de la masse volumique	105
II.3.3.4.	Le cas particulier de <i>Fagus</i>	105
	Conclusion du chapitre III : de l'expérimentation au contexte archéologique	107

CHAPITRE IV :

CHARBONS DE BOIS ET PHÉNOMÈNES PÉRIGLACIAIRES, APPROCHE EXPÉRIMENTALE	111
Introduction.....	112
I. EXPÉRIMENTATION IN VIVO DANS LES PYRÉNÉES ESPAGNOLES	118
I.1. Le Programme « Gavarnie »	118
I.1.1. Le site expérimental	119
I.1.2. Le régime thermique du site	120
I.1.2.1. Contexte général.....	120
I.1.2.2. Implantation des stations d'enregistrements thermiques	120
I.1.2.3. Résultats.....	122
I.2. Protocole expérimental	124
I.2.1. Zone de dépôt et principaux effets actifs sur les cellules expérimentales.....	124
I.2.2. Composition des cellules expérimentales	125
I.2.3. Types de dépôts et durée d'exposition	126

I.2.4.	Limites du protocole expérimental et contraintes de terrain : les adaptations possibles	127
I.2.4.1.	Contraintes de prélèvement en haute montagne	127
I.2.4.2.	Protocole et contraintes d'analyse du matériel.....	128
I.2.4.3.	Adaptations possibles du protocole.....	128
I.2.5.	Prélèvement, traitement et analyse du matériel.....	129
I.2.5.1.	Prélèvement des dépôts de surface.....	130
I.2.5.2.	Prélèvement des dépôts enterrés.....	130
I.2.5.3.	Traitement en laboratoire.....	131
I.2.5.4.	Analyse du matériel	131
I.3.	Présentation des résultats.....	132
I.3.1.	Fonctionnement et altération des cellules expérimentales.....	132
I.3.1.1.	Observations générales et temporelles	132
I.3.1.2.	Déplacements verticaux dans les dépôts enterrés	134
I.3.1.3.	Dispersion, perte et fragmentation du matériel.....	136
I.3.2.	Niveau d'information taxonomique	143
I.3.2.1.	Pourcentage de disparition par taxon en fonction du type de dépôt et de l'année de prélèvement	143
I.3.2.2.	Pourcentage de fragments dispersés par taxon en fonction du type de dépôt et de l'année de prélèvement	144
I.3.2.3.	Fragmentation des taxons par type de dépôt et par année	146
I.3.3.	Analyse statistique	147
I.3.3.1.	Disparition.....	148
I.3.3.2.	Dispersion.....	149
I.3.3.3.	Fragmentation.....	150
I.3.3.4.	Fragmentation des taxons par classe de taille.....	153
I.4.	Synthèse et discussion.....	159
IV.	EXPÉRIMENTATION IN VITRO : MESURE DES EFFETS DES ALTERNANCES DE GEL ET DÉGEL DU SÉDIMENT SUR LES CHARBONS DE BOIS.....	162
II.1.	Protocole expérimental.....	162
II.1.1.	Échantillons expérimentaux	162
II.1.2.	Sédiment encaissant.....	163
II.1.3.	Cycles gel-dégel	164
II.1.4.	Tamissage, pesée et décompte des fragments.....	165
II.2.	Présentation des résultats.....	165
II.2.1.	Fragmentation des charbons de bois dans les deux lots d'échantillons expérimentaux : observations générales	165
II.2.2.	Homogénéité de la fragmentation dans les deux lots d'échantillons expérimentaux	167

II.2.3.	Analyse statistique de la fragmentation.....	168
II.2.4.	Fragmentation des charbons issus de bois altéré	178
II.2.5.	Influence des caractéristiques physiques des fragments initiaux et des taxons sur la fragmentation	179
II.2.6.	Influence des caractéristiques physiques sur la production des différentes tailles de fragments	180
II.3.	Synthèse des résultats et discussion.....	182
	Conclusion du chapitre IV.....	186

CHAPITRE V :

MÉTÉORISATION, PROCESSUS SÉDIMENTAIRES, ACTION DE L'EAU, VARIATIONS DU PH DU MILIEU ET PIÉTINEMENT : LES EFFETS INDUITS SUR LES CHARBONS DE BOIS

I.	La fragmentation des charbons de bois par météorisation	192
I.1.	Introduction	192
I.2.	Protocole expérimental.....	193
I.2.1.	Stations de dépôt	193
I.2.2.	Enregistrements météorologiques.....	194
I.2.3.	Échantillons expérimentaux	197
I.2.4.	Temps de dépôt et traitement du matériel à l'issue de l'expérimentation	197
I.3.	Présentation des résultats.....	198
I.3.1.	Fragmentation des charbons de bois dans les deux stations expérimentales : observations générales.....	198
I.3.2.	Homogénéité de la fragmentation entre les lots de chaque station	200
I.3.3.	Analyse statistique de la fragmentation.....	202
I.3.3.1.	Station de Levens	202
I.3.3.2.	Station de Valbonne.....	211
I.3.5.	Mode de fragmentation des taxons dans les deux stations.....	218
I.3.6.	Facteurs incidents sur la fragmentation.....	219
I.4.	Synthèse et discussion : sensibilité aux agents météoriques	221
II.	Effets des cycles de retrait-gonflement du sédiment sur les charbons de bois	224
II.1.	Introduction	224
II.2.	Protocole expérimental.....	225
II.2.1.	Matrice sédimentaire, composition et montage du dispositif expérimental	225
II.2.2.	Cycles retrait-gonflement et forces en jeu.....	226
II.2.3.	Traitement du matériel expérimental.....	226
II.3.	Présentation des résultats.....	227
II.3.1.	Fragmentation des charbons de bois dans les deux lots d'échantillons : observations générales.....	227
II.3.2.	Homogénéité de la fragmentation entre les deux lots expérimentaux	229

II.3.3.	Analyse statistique de la fragmentation.....	230
II.3.4.	Facteurs incidents sur la fragmentation.....	237
II.4.	Synthèse et discussion.....	238
III.	Essais d’alternances imbibition-dessiccation des fragments de charbons de bois et effets du pH sur le matériel anthracologique	241
III.1.	Introduction	241
III.2.	Protocoles expérimentaux	241
III.2.1.	Composition des lots d’échantillons et dispositifs expérimentaux.....	241
III.2.2.	Traitement du matériel expérimental.....	243
III.3.	Présentation des résultats des tests d’imbibition-dessiccation	244
III.3.1.	Fragmentation des charbons de bois dans les deux lots d’échantillons : observations générales.....	244
III.3.2.	Homogénéité de la fragmentation entre les deux lots expérimentaux.....	245
III.3.3.	Analyse statistique de la fragmentation.....	246
III.3.4.	Facteurs incidents sur la fragmentation.....	251
III.4.	Présentation des résultats des essais de variation du pH.....	252
III.5.	Synthèse et discussion.....	253
IV.	Le piétinement des charbons de bois.....	256
IV.1.	Introduction	256
IV.2.	Expérience 1.....	257
IV.2.1.	Protocole expérimental.....	257
IV.2.1.1.	Composition des échantillons et déroulement de l’expérimentation ..	257
IV.2.1.2.	Traitement du matériel expérimental.....	258
IV.2.2.	Présentation des résultats.....	259
IV.2.2.1.	Fragmentation des charbons de bois dans les deux lots d’échantillons : observations générales	259
IV.2.2.2.	Homogénéité de la fragmentation entre les deux lots expérimentaux	260
IV.2.2.3.	Analyse statistique de la fragmentation	262
IV.2.2.4.	Facteurs incidents sur la fragmentation	274
IV.3.	Expérience 2.....	275
IV.3.1.	Protocole expérimental.....	275
IV.3.1.1.	Mise en place des cellules expérimentales et composition des échantillons.....	275
IV.3.1.2.	Traitement du matériel expérimental.....	276
IV.3.2.	Présentation des résultats.....	277
IV.3.2.1.	Fragmentation des charbons de bois dans les deux cellules expérimentales : observations générales	277
IV.3.2.2.	Homogénéité de la fragmentation dans les deux cellules expérimentales	278

IV.3.3. Analyse statistique de la fragmentation.....	279
IV.4. Synthèse, comparaison et discussion des résultats	284
Synthèse et conclusion du chapitre V	288

CHAPITRE VI :

SYNTHÈSE ET DISCUSSION : CONSERVATION ET REPRÉSENTATIVITÉ DES CHARBONS DE BOIS EN CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE

I. Le processus de fragmentation : Reprise synthétique des résultats	292
I.1. Fragmentation par expérimentation	292
I.1.1. L'augmentation du nombre total de fragments.....	292
I.2. Fragmentation par taxon	300
I.2.1. Augmentation du nombre total de fragments pour les taxons issus du lot de bois A	301
I.2.2. Augmentation du nombre total de fragments pour les taxons issus du lot de bois B	303
I.2.3. Analyse des résultats.....	304
I.2.3.1. Variabilité taxonomique de la fragmentation dans le lot de bois A	304
I.2.3.2. Variabilité taxonomique dans le lot de bois B	305
I.3. Interaction des effets « processus », « taxon » et « lot » sur la fragmentation des charbons de bois	306
I.4. L'échelle du fragment	313
I.4.1. Variabilité de la fragmentation des taxons par classe de taille.....	313
I.4.1.1. Répartition des fragments par classe de taille dans le lot de bois A	314
I.4.1.2. Répartition des fragments par classe de taille dans le lot de bois B.....	316
I.4.2. Significativité des différences de fragmentation et biais d'interprétation	318
II. Synthèse générale et discussion	321
II.1. Impact des différentes sollicitations sur les charbons de bois	321
II.2. La variabilité taxonomique et les facteurs influents	325
II.3. Variabilité intra-spécifique, intra-genre et autres facteurs de variabilité	329
II.3.1. Variabilité intra-spécifique	330
II.3.2. Variabilité intra-genre	330
II.3.3. Le cas particulier de <i>Quercus pubescens</i>	332
II.3.4. État du bois ante-combustion	333
II.3.5. Conséquences de la variabilité taxonomique de la fragmentation en anthracologie	334
II.4. Identification des biais quantitatifs et représentativité de l'assemblage anthracologique	336
CONCLUSION GÉNÉRALE	352

BIBLIOGRAPHIE	358
LISTE DES FIGURES	384
LISTE DES TABLEAUX.....	390
LISTE DES PLANCHES	392
RÉSUMÉ	393
ANNEXES	395
TABLE DES MATIÈRES DES ANNEXES	395
LISTE DES FIGURES PRÉSENTÉES EN ANNEXES	455
LISTES DES PLANCHES PRÉSENTÉES EN ANNEXES	459

INTRODUCTION

Notre travail se situe à la charnière entre une problématique archéologique, issue du constat de l'hétérogénéité de la conservation des charbons de bois en contexte archéologique, et une problématique proprement anthracologique, relative à la conservation différentielles des taxons et la représentativité des assemblages anthracologiques. Parallèlement, il tire son origine de la grande méconnaissance qui entoure le matériau charbon de bois lui-même, et plus encore la variation taxonomique de ses propriétés. Aucune donnée d'ensemble ne permet pour l'heure d'appréhender le fonctionnement de ce matériau et donc sa capacité de résistance et de conservation en contexte archéologique. De même, le processus de fragmentation n'a été que très peu et très partiellement étudié, alors même que le fragment constitue en anthracologie l'unité de mesure de base de l'analyse. Acquérir une meilleure connaissance des mécanismes de fragmentation des charbons de bois, et ainsi de la formation des assemblages, revêt dès lors une importance particulière.

Le travail que nous présentons dans les pages qui suivent a donc pour objectif d'étudier les propriétés du « matériau charbon de bois » et son comportement lorsque celui-ci est soumis à différents types de sollicitations. Il s'agit de produire un premier référentiel expérimental permettant d'envisager l'incidence des processus post-dépositionnels sur le matériel anthracologique en contexte archéologique. Nous nous focalisons plus particulièrement sur les sites paléolithiques dans lesquels l'importance et la récurrence des processus post-dépositionnels identifiés posent de manière plus pressante la question de leur impact sur les assemblages anthracologiques. Nous abordons plus largement la question de la conservation et la fragmentation différentielles des charbons de bois et, corrélativement, la représentation quantitative des taxons dans l'assemblage anthracologique.

I. L'APPROCHE TAPHONOMIQUE EN ARCHÉOLOGIE

Parce qu'il s'attache à mieux connaître les mécanismes qui conduisent à la formation des assemblages que l'on étudie, à en évaluer la représentativité et à mesurer les éventuels biais d'interprétation que peuvent générer la conservation et la fragmentation différentielles

de notre objet d'étude – le charbon de bois – en lien avec ses propriétés physico-chimiques et mécaniques, notre travail s'inscrit dans la lignée des travaux sur la « taphonomie ». Le terme, introduit par Efremov en 1940, vient du grec « *taphos* », le tombeau, et « *nomos* », la loi. La taphonomie, alors considérée comme une nouvelle branche de la paléontologie, étudie « les lois de l'enfouissement et de la fossilisation », c'est-à-dire le passage des restes ou produits des organismes vivants de la biosphère à la lithosphère (Efremov, 1940, pp. 85 ; 1959). Par extension, la taphonomie s'attache aussi à évaluer les biais paléoécologiques résultant du passage d'un individu d'une communauté vivante à une communauté fossile. Au cours des années 70-80 l'approche taphonomique se développe sous l'impulsion des paléontologues, puis s'étend à l'archéologie notamment via l'étude des vestiges osseux (Behrensmeyer, 1978, 1980, 1983, 1986 ; Brain, 1969, 1981 ; Binford, 1981, 1985 ; Wood and Johnson, 1978 ; etc.). Elle constitue dès lors un nouveau champ d'étude qui se développe largement au cours des années 90 et 2000 en intégrant progressivement tous les types de vestiges archéologiques, depuis l'échelle macroscopique jusqu'à l'échelle microscopique (notamment, Havinga, 1984 ; Campetti *et al.*, 1989 ; Fosse, 1994 ; Reiche, 1997 ; Théry-Parisot, 1998, 2001 ; Campbell, 1999 ; Laroulandie, 2000 ; Bordes, 2002 ; Dauphin et Williams, 2004 ; Albert *et al.*, 2006 ; Nowell et d'Errico, 2007 ; Lebreton, 2010 ; Karkanas, 2010, etc.). L'impact d'agents variés d'altération et de modification des vestiges est étudié via une démarche actualiste et/ou expérimentale (Courtin et Villa, 1982 ; Plisson et Mauger, 1988 ; Guadelli, 1989 ; Brugal *et al.*, 1997 ; Brugal et Fosse, 2004 ; Villa *et al.*, 2004 ; Théry-Parisot *et al.*, 2004 ; Lenoble, 2005, 2008a ; Bertran, 2006 ; Coumont, 2006 ; Mallye, 2007 ; Cabanes, 2011 ; etc.) et les premiers projets expérimentaux pluridisciplinaires, intégrant archéozoologues, archéologues lithiciens, géologues, géomorphologues et géoarchéologues voient le jour (Texier *et al.*, 1998 ; Lenoble *et al.*, 2008b, 2009 ; Bertran, 2009a). En archéologie, une place de plus en plus grande est en retour accordée aux processus de formation des sites (Texier, 2000, 2006a et b ; Lenoble *et al.*, 2000 ; Goldberg *et al.*, 2001 ; Bertran, 2005 ; Karkanas et Goldberg, 2010 ; Kervaso et Texier, 2009-2010, etc.), impliquant d'importants développements méthodologiques et la mise sur pied ou la systématisation de l'usage d'outils d'analyses (Goldberg, 1980 ; Van Vliet-Lanoë, 1987 ; Courty *et al.*, 1989 ; Brochier, 1996, 2002 ; Albert, 1999, 2000, 2003, 2012 ; Bertran, 1999 ; Macphail *et al.*, 1999 ; Karkanas, 2000, 2002 ; Bertran et Lenoble, 2002 ; Lenoble et Bertran, 2004 ; Goldberg et

Macphail, 2006 ; Mallol *et al.*, 2007, 2010 ; Bertran *et al.*, 2010 ; Goldberg et Berna, 2010 ; Mallol et Bertran, 2010, etc.), parmi lesquels la sédimentologie et la micromorphologie prennent une part essentielle. À partir de 2007, la création du Réseau Thématique Pluridisciplinaire « Taphonomie », piloté par J.-P. Brugal, a initié une nouvelle dynamique en favorisant la mise en commun des différentes approches (théoriques et méthodologiques) et des résultats acquis par la communauté scientifique – très diverse – que la taphonomie préoccupe. Identifiée comme domaine pluridisciplinaire, par essence charnière, la « taphonomie » a fédéré cette communauté notamment au cours d'une série de rencontres thématiques, qui chacune donna lieu à la publication de volumes collectifs (Costamagno *et al.*, 2008 ; Costamagno et Théry-Parisot, 2009 ; Thiebaut *et al.*, 2010a ; Mallol et Bertran, 2010 ; Théry-Parisot *et al.*, 2010c ; Laroulandie *et al.*, 2011). Ces travaux et rencontres ont par ailleurs permis de définir et de formaliser, de manière transversale comme au sein de chaque discipline, les champs et les approches théoriques et conceptuelles – pas toujours identiques selon l'objet d'étude – de la « taphonomie » ; parallèlement, les zones encore lacunaires en l'état actuel de la recherche ont pu être identifiées.

En archéobotanique, l'approche taphonomique est récente et la faible représentation des botanistes lors des premières rencontres du RTP témoignait du retard relatif de nos disciplines dans ce domaine de recherche. Pour l'anthracologie, il apparaît très clairement que les données manquent pour mieux appréhender les phénomènes qui président à la formation et l'altération des assemblages.

II. ANTHRACOLOGIE ET TAPHONOMIE

Née à la fin du XIXe siècle, mais se développant principalement à partir de la seconde moitié du XXe siècle, l'anthracologie est une discipline relativement jeune. Initialement ancrée dans une perspective paléobotanique, c'est d'abord la question de la représentativité paléoécologique des charbons de bois qui a occupé la communauté scientifique. La pertinence de l'anthracologie pour la restitution des paléo-environnements est progressivement mise en évidence par une série de travaux fondateurs (notamment Salisbury et Jane, 1940 ; Santa, 1961 ; Vernet, 1973 ; Bazile-Robert, 1979 ; Thiébault, 1980). À la fin des années 80, puis au cours des années 90, les travaux, notamment réalisés autour

de « l'école de Montpellier » (Bazile-Robert, 1979, 1981, 1982 ; Chabal, 1982, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992 ; Badal-Garcia, 1988, 1990, 1992 ; Heinz, 1990 ; Figueiral, 1992, etc.), posent les fondements méthodologiques et conceptuels de la discipline. On cherche alors à définir la taille et le nombre minimal de charbons à étudier par échantillon, la surface à échantillonner, et l'on compare la pertinence des unités de mesure possibles. Par ailleurs, les prérequis et conditions théoriques de la représentativité paléoécologique des assemblages anthracologiques sont énoncés (Chabal, 1991, 1992, 1994), assurant ainsi à la discipline un réel essor.

Plus récemment, les travaux ont montré le potentiel de l'anthracologie pour la caractérisation des pratiques humaines en relation avec le bois de feu (notamment Solari, 1992 ; Uzquiano, 1997 ; Tengberg, 1998 ; Théry-Parisot, 1998, 2001 ; Dufraisse, 2005 ; Dotte, 2010 ; Henry, 2011). Au-delà des informations paléoécologiques, plus classiques, la gestion du bois de feu, en tant que sous-système technique, est apte à documenter les modes de vie des sociétés préhistoriques (Théry-Parisot, 1998, 2001 ; Henry, 2011). Depuis la fin des années 90 et au cours des années 2000, la recherche s'est orientée vers la définition et la caractérisation des différents filtres qui peuvent modifier le spectre anthracologique en termes quantitatifs et qualitatifs et ainsi fausser l'image perçue de la végétation. Les travaux principalement initiés par Théry-Parisot conduisent à appréhender l'assemblage anthracologique du point de vue taphonomique. Le terme « taphonomie » étant ici considéré dans une acceptation large (Théry-Parisot *et al.* 2010a), c'est-à-dire incluant i) les pratiques humaines et la potentielle sélection du combustible, ii) les modifications physiques et chimiques du bois au cours de la combustion, iii) les processus dépositionnels et post-dépositionnels.

Les pratiques anthropiques relèvent de facteurs culturels non prédictibles et spécifiques à chaque groupe humain. A l'inverse, la combustion et les processus post-dépositionnels renvoient à des transformations physico-chimiques et mécaniques indépendantes du contexte socio-culturel, qui affectent les assemblages anthracologiques en termes de réduction de masse et de fragmentation.

C'est dans cette perspective qu'ont été menées les études sur la combustion (Bazile-Robert, 1982 ; Rossen et Olson, 1985 ; Smart et Hoffman, 1988 ; Scott et Jones 1991 ; Loreau 1994 ; Vaughan et Nichols 1995 ; Belcher *et al.* 2005 ; Lingens *et al.* 2005 ; Braadbaart et Poole,

2008 ; Théry-Parisot *et al.*, 2010b), lesquelles ont démontré que le comportement au feu des espèces n'est pas linéaire, suggérant ainsi que la combustion affecte les assemblages anthracologiques sur le plan quantitatif de manière aléatoire et qu'il est encore difficile d'en appréhender les effets (Théry-Parisot *et al.*, 2010a ; Théry-Parisot *et al.*, 2010b).

La question de l'impact des processus post-dépositionnels sur les assemblages anthracologiques est au départ essentiellement la préoccupation des pédo-anthracologues et ce sont donc les phénomènes de déplacement des charbons de bois – transport par l'eau et le vent, bioturbations – qui ont principalement fait l'objet d'étude (Thinon, 1992 ; Vaughan et Nichols, 1995 ; Carcaillet et Talon, 1996 ; Blackford, 2000 ; Nichols *et al.*, 2000 ; Scott *et al.*, 2000 ; Carcaillet, 2001). Ce sont l'intégrité et la représentativité paléoécologique, géographique et chronologique des dépôts qui sont ici questionnées. Ces aspects sous-tendent l'ensemble des recherches menées par les anthracologues eux-mêmes, dont la première préoccupation consiste logiquement à identifier et mesurer les biais d'interprétation paléoécologiques des spectres anthracologiques.

À l'échelle du matériau lui-même, des altérations diagénétiques ont été envisagées et les récentes études ont montré que des modifications structurelles des charbons de bois apparaissent en milieu alcalin, mais que les processus physiques sont majoritairement responsables de la dégradation du matériel (Schiegl *et al.*, 1996 ; Cohen-Ofri, 2006 ; Braadbaart et Poole, 2009 ; Ascough *et al.*, 2010, 2011a et b). Parmi ces processus physiques, les actions mécaniques, qui agissent directement sur la fragmentation du matériel, jouent un rôle prépondérant, mais seules des études ponctuelles documentent les propriétés et la fragmentation mécanique des charbons de bois (Théry-Parisot, 1998, 2001 ; Lancelotti *et al.*, 2010), sans toujours inclure la variable taxonomique.

III. FRAGMENTATION DES CHARBONS DE BOIS ET REPRÉSENTATIVITÉ DES ASSEMBLAGES ANTHRACOLOGIQUES

Les interprétations paléo-environnementales en anthracologie sont en partie fondées sur la variation des fréquences relatives des taxons, elles-mêmes calculées à partir du décompte des fragments identifiés dans un échantillon. La fragmentation différentielle des taxons, si elle existe, est donc susceptible d'introduire des aléas quantitatifs et de biaiser nos

interprétations. L'étude du phénomène de fragmentation des charbons de bois représente dès lors un enjeu méthodologique majeur pour la discipline, en ce sens que la fragmentation constitue une part importante de la fonction inconnue qui relie le spectre anthracologique à la végétation initiale que l'on cherche à reconstituer. Or, le phénomène de fragmentation lui-même, et surtout, l'éventuelle variation de son expression à l'échelle taxonomique, n'a été que très peu étudié. En dehors des travaux sur la combustion évoqués précédemment - qui tous ne considèrent pas la production de résidus en termes de nombre de restes, mais attestent globalement d'un comportement au feu différentiel des taxons -, la plupart des recherches reposent sur l'analyse directe des échantillons archéologiques, sans comparaison possible avec une situation initiale connue. L'étude fondatrice sur la question de la fragmentation a été menée par Chabal dans les années 90 via l'anthracanalyse des sites protohistoriques de Lattes et du Marduel. Elle concerne l'état final de fragmentation et inclue donc de manière indifférenciée toutes les étapes de transformation de l'assemblage et de fragmentation du matériau. Dans ces deux sites, la distribution de la fragmentation (nombre de fragments par classe de masse de 0.03g) est statistiquement homogène entre les taxons comme entre les niveaux ; elle est proche d'une loi de Poisson, dont le paramètre varie d'un site à l'autre. L'« état de fragmentation », « *c'est-à-dire l'éventail des masses individuelles des fragments, n'est [donc] pas propre à chaque essence* » (Chabal, 1997, p. 47). Cette analyse conduit à la formulation d'une « *loi de fragmentation unique pour tous les taxons* », dépendante du contexte d'enfouissement (Chabal, 1989, 1990, 1991, 1997). Menée *a posteriori* sur du matériel archéologique, l'étude ne permet pas de mesurer l'incidence des différents facteurs de distorsion (combustion, processus post-dépositionnels, fouille, prélèvement et tamisage du matériel) et suggère au contraire, que l'état final de la fragmentation des taxons est le résultat de l'addition des étapes de distorsion, laquelle conduit progressivement à une forme d'homogénéisation où persistent quelques aléas qu'il est théoriquement possible de corriger. Ces résultats argumentent dans le sens d'une faible distorsion des assemblages et valident l'hypothèse anthracologique telle que formulée par l'auteur : « *Le spectre anthracologique est une fonction de la flore et de la végétation passée moyennes pour l'aire de prélèvement du bois et l'intervalle de temps mesuré. [...]. Cette image est intelligible en termes d'évolution floristique et structurale des végétations passées* » (Chabal, 1991, p. 18). Cette hypothèse n'est pas « démontrable »,

mais seulement « réfutable ». Moyennant des conditions de prélèvement et d'échantillonnage adéquates (Chabal, 1982, 1988, 1991), elle repose sur trois arguments majeurs : i) les spectres livrent un grand nombre d'espèces ; ii) ils sont reproductibles (dans une même zone géographique et pour une même période) ; iii) les proportions entre essences dans les spectres anthracologiques ressemblent à leurs proportions dans les milieux actuels. Ces observations mettent en avant « *la signification écologique indubitable des charbons de bois* » (Chabal, 1994, p. 326), largement confirmée par la pertinence des nombreuses analyses anthracologiques réalisées.

Parallèlement, d'autres travaux ont porté sur la plus ou moins bonne représentativité de l'anthraco-analyse en fonction de la taille des fragments étudiés (Badal Garcia, 1992 ; Chabal, 1988, 1991 ; Henry, 2011). Ils montrent que l'information paléoenvironnementale globale varie peu selon que l'on étudie les charbons inférieurs ou supérieurs à 4mm, ce qui confirme indirectement les résultats de Chabal concernant l'état de fragmentation final des taxons. Toutefois des aléas de fragmentation sont notés dans l'une comme dans l'autre de ces approches sans que l'on puisse réellement estimer leur incidence sur les résultats de l'anthraco-analyse. De même, nous n'avons pas à notre disposition d'outil permettant, dans une mise en œuvre pratique et quotidienne, de corriger ou seulement de détecter de manière claire ces aléas de sous- et sur-fragmentation des taxons. Enfin, si l'état final de fragmentation semble relativement homogène entre les taxons dans les sites récents, il n'est pas dit qu'il en soit ainsi dans les sites paléolithiques beaucoup plus affectés par les processus post-dépositionnels. Par ailleurs, le constat de l'indigence, voire de l'absence de résidus dans certains sites pose en effet la question de la conservation des vestiges – particulièrement prégnante en Préhistoire –, mais s'articule aussi avec le débat sur les origines de l'usage intentionnel du feu, ou encore les systèmes de mobilité et les modes d'occupation des gisements préhistoriques.

IV. ENTRE ÉVIDENCES ARCHÉOLOGIQUES ET TAPHONOMIE : LA QUESTION DE L'ORIGINE ET DE L'UTILISATION DU FEU PAR LES SOCIÉTÉS PRÉHISTORIQUES

L'origine de l'usage intentionnel et contrôlé du feu par les hommes est une question qui fait encore débat aujourd'hui, malgré les nombreux travaux qui lui ont été consacrés

(Sauer, 1962 ; Perlès, 1977 ; Gowlett *et al.*, 1981 ; Brain et Sillen, 1988 ; Rowlett, 2000 ; Weiner *et al.*, 2000 ; Alperson-Afil, 2008, 2012 ; Karkanas *et al.*, 2007, Fernández Peris *et al.*, 2012 ; etc.). Si dans les sites très anciens, le caractère intentionnel de l'utilisation du feu est contesté (Binford *et al.*, 1985 ; Barbetti, 1986 ; Clark et Harris, 1985 ; James, 1989 ; Goldberg *et al.*, 2001), à partir de 400 000 – 300 000 ans, les données convergent et semblent indiquer que le feu fait alors partie intégrante du bagage technologique des Hominidés (Roebroeks et Villa, 2011a). La proportion de sites présentant des traces incontestables de l'usage du feu augmente à partir du Paléolithique moyen et plus encore au Paléolithique supérieur. La présence de pierres et/ou de silex chauffés, d'os brûlés est fréquente dans les gisements préhistoriques, en revanche, la conservation des structures de combustion à proprement parler est plus rare, surtout en Europe. De même, les charbons de bois ne sont pas nécessairement préservés dans les dépôts, même lorsque l'usage du feu est indubitable. Ils sont quelquefois très abondants ou au contraire présents en très faible quantité, voire complètement absents.

Il serait tentant d'imaginer que la conservation des charbons de bois dans les sites préhistoriques suit des gradients chronologiques et géographiques simples : plus le site est ancien, moins les charbons sont conservés ; plus il se situe sous des latitudes élevées, soumises à des conditions extrêmes durant les périodes glaciaires, moins les charbons sont conservés. Évidemment, ces gradients sont en partie effectifs : la présence de charbons de bois a globalement tendance à augmenter avec le temps ; en Europe, les sites les plus au sud, et en particulier en région méditerranéenne, sont plus souvent propices à la bonne préservation du matériel anthracologique. Mais alors même que les charbons de bois sont absents d'une partie des séquences ou niveaux moustériens de l'Ouest de la France (cf. chapitre I), des fragments de charbons épars sont conservés dans certains sites du Paléolithique inférieur d'Angleterre (Boxgrove – Roberts et Parfitt, 1999 – ; High Lodge - Ashton *et al.*, 1992 –). La conservation des charbons de bois est donc, à l'évidence, un phénomène complexe qui ne suit pas strictement des gradients chronologiques, altitudinaux ou latitudinaux.

De même, la quantité de charbons de bois résiduels doit en partie dépendre de l'intensité des activités de combustion et donc de la fonction du site et éventuellement de sa durée d'occupation. Il n'est pas surprenant que les résidus soient rares ou absents dans un site

occupé de manière très ponctuelle, dans lequel se seront déroulés quelques courts épisodes de combustion seulement. Mais l'indigence des restes dans des niveaux riches en matériel archéologique (par exemple certains niveaux de l'Abri Pataud –Théry-Parisot, 1998, 2002 – ou de La Quina - Debénath et Jelinek, 1998 –) montre que l'intensité de l'occupation n'est pas seule déterminante de la quantité de matériel préservée.

Dans certains sites, l'absence de charbons de bois associée à des quantités remarquables de charbons d'os a conduit les chercheurs à s'interroger sur la possibilité d'une utilisation de l'os comme combustible, laquelle pourrait venir palier un manque de disponibilité de la ressource ligneuse dans l'environnement au cours des phases les plus rigoureuses des cycles glaciaires. Or, les études expérimentales et contextuelles ont montré (i) que ce lien de cause à effet entre l'environnement végétal et le choix de l'os comme combustible est difficile à établir, (ii) que l'utilisation de l'os est indissociable de celle du bois et (iii) que les interactions physico-chimiques de l'os et du bois lors de leur utilisation conjointe ne permettent pas d'expliquer l'absence de charbons de bois dans les foyers. (Théry, 2001 ; Théry et Costamagno, 2005 ; Costamagno *et al.*, 2005, 2009, 2010). La présence de charbons d'os ne signifie donc pas la non-utilisation du bois comme combustible. De même, au cours des phases froides, qui voient le développement d'environnements steppiques, on peut supposer que des combustibles végétaux non ligneux, ne produisant pas de résidus étudiables, ont été utilisés en quantité. Pour autant, dans certains gisements dans lesquels les charbons de bois sont rares, les analyses phytolithiques ont montré que le bois est le combustible végétal majoritaire. C'est par exemple le cas des foyers cryoturbés de la Grotte XVI (Karkanas *et al.*, 2002).

L'ancienneté, la localisation, la fonction du site et sa durée d'occupation ou l'intensité des activités liées au feu et la variété des combustibles utilisés, ainsi que l'importance des processus post-dépositionnels, peuvent avoir une influence sur la formation puis la conservation du dépôt anthracologique. L'état final du dépôt dépend donc à la fois de facteurs anthropiques et taphonomiques. Identifier la part de responsabilité de ces facteurs dans la formation et la préservation des assemblages constitue le cœur de la démarche taphonomique, permettant un gain d'information en ce sens que la présence comme l'absence de résidus deviennent en retour porteuses de sens.

V. VERS UNE APPROCHE EXPÉRIMENTALE DE L'IMPACT DES PROCESSUS POST-DÉPOSITIONNELS SUR LES ASSEMBLAGES ANTHRACOLOGIQUES

Étudier les effets des processus post-dépositionnels sur les charbons de bois comprend plusieurs niveaux d'analyse distincts : i) déterminer les caractéristiques structurales et les **propriétés mécaniques** du « matériau charbon », qui, à **l'échelle du dépôt**, peuvent conduire à **l'altération ou la disparition** du matériel anthracologique, ii) mesurer, à **l'échelle de l'assemblage anthracologique**, s'il existe une **hétérogénéité taxonomique** de ces propriétés, qui sous-tend une **conservation différentielle** et un **biais de représentation des essences**, iii) à **l'échelle du fragment**, il s'agit de déterminer si **l'intensité et les modalités de fragmentation** sont identiques pour tous les taxons et si l'une des **classes de taille** de fragments est plus **représentative sur le plan quantitatif**. C'est dans cette triple perspective que s'inscrit notre travail, lequel fait, dans une large mesure, appel à l'expérimentation.

À l'échelle du site, l'étude des processus dépositionnels et post-dépositionnels permet, en amont de l'intervention des différentes disciplines, de questionner l'intégrité de l'ensemble des dépôts. L'observation de « l'état final » des dépôts peut permettre la mise en évidence de phénomènes de dispersion du matériel, de mélange des couches et même d'altération ou de sur-fragmentation des charbons de bois. En aucun cas cette observation ne nous renseigne sur le fonctionnement du « matériau charbon de bois » en lui-même – sa durée de vie, sa capacité de résistance en fonction des processus mécaniques ou diagénétiques en jeu –. Il est par ailleurs probable que l'altération et la sur-fragmentation du matériel résultent de phénomènes complexes, impliquant des processus imbriqués et mécanismes de réactions en chaîne, que l'observation *a posteriori* ne peut documenter. La voie expérimentale, en permettant une dissociation des facteurs agissants, apparaît dès lors comme un recours indispensable pour s'affranchir de cette complexité.

Cependant, l'expérimentation ne peut se substituer à l'observation de la réalité archéologique, laquelle est à l'origine du questionnement. De même, l'état final du dépôt anthracologique en contexte archéologique dépend de facteurs multiples qu'il convient de déterminer. Aussi dans une première partie, nous aborderons la question de la **formation du dépôt anthracologique** du point de vue théorique en détaillant les diverses étapes qui

peuvent influencer l'abondance, l'indigence ou l'absence des charbons de bois dans les gisements paléolithiques. Par le développement de quelques exemples archéologiques, nous tenterons de mettre en évidence l'impact de ces différents facteurs et d'identifier les processus post-dépositionnels ayant un effet majeur sur la conservation des charbons de bois dans les gisements du Paléolithique moyen et supérieur.

Une réflexion sur la conservation du charbon de bois ne peut s'affranchir d'une connaissance du matériau lui-même. Or, si la caractérisation des propriétés physico-chimiques des différents types de vestiges a fait l'objet de nombreuses études dans la plupart des disciplines, le charbon de bois est en revanche particulièrement méconnu. Après avoir exposé au chapitre II **les outils et principes méthodologiques** retenus pour la réalisation du travail que nous présentons, le chapitre III abordera donc le charbon en tant que matériau, depuis la matière dont il provient - le bois – et sa transformation au cours de la combustion, jusqu'à **la caractérisation des propriétés mécaniques et modalités de la fragmentation des charbons de bois**. Des tests de compression mécanique réalisés sur dix essences communes d'Europe permettent de prendre en considération la variabilité interspécifique.

Les phénomènes cryogéniques induisent des pressions mécaniques importantes et participent potentiellement de la fragmentation des charbons de bois dans les gisements du Pléistocène. Le quatrième chapitre est donc consacré à l'étude des effets **du gel-dégel** sur la **conservation** des résidus carbonisés. Il présente les résultats de deux expérimentations visant à documenter l'impact des phénomènes périglaciaires sur les charbons de bois de plusieurs taxons. L'une est conduite en contexte naturel montagnard sous climat tempéré, l'autre consiste à simuler les effets des alternances gel-dégel en conditions contrôlées. Le cinquième chapitre étudie les effets des cycles **de retrait-gonflement du sédiment et d'imbibition-dessiccation des fragments eux-mêmes, du piétinement, de la météorisation, de l'action de l'eau et de son pH** sur la conservation des charbons de bois.

Enfin, le dernier chapitre de ce mémoire présente une synthèse des résultats expérimentaux. Elle permet d'envisager **les processus ou combinaisons de situations ayant le plus d'impact sur l'intégrité des résidus de combustion du bois en contexte archéologique** ; les mécanismes de fragmentation propres aux taxons testés sont mis en évidence, enfin **la question de la représentativité des assemblages anthracologiques et de**

la possibilité d'identification des biais quantitatifs est considérée à la lumière des résultats obtenus.

CHAPITRE I

LA CONSERVATION DES CHARBONS DE BOIS DANS LES GISEMENTS PALEOLITHIQUES : APPROCHE THÉORIQUE ET SYNTHÈSE DES DONNÉES DISPONIBLES

Introduction

L'observation de la réalité archéologique montre que la préservation des dépôts anthracologiques dans les gisements du Paléolithique est variable, sans que des facteurs simples et systématiques puissent jusqu'alors expliquer cette hétérogénéité. Les différences de préservation des charbons de bois d'un site à l'autre nous amènent à interroger le processus de formation et de conservation du dépôt anthracologique. Quelles pratiques anthropiques et processus syn-dépositionnels et post-dépositionnels participent de la constitution et de la préservation du dépôt anthracologique ? Quels sont les facteurs influents ? Leur part de responsabilité dans la mise en place du dépôt, depuis sa genèse jusqu'à son état de découverte, peut-elle être identifiée ?

I. ABONDANCE, INDIGENCE OU ABSENCE DES CHARBONS DE BOIS DANS LES GISEMENTS PALÉOLITHIQUES : LES FACTEURS MULTIPLES D'UNE RÉALITÉ ARCHÉOLOGIQUE HÉTÉROGÈNE

I.1. Genèse du dépôt anthracologique

I.1.1. À l'origine du dépôt anthracologique : l'utilisation du feu et la gestion des combustibles au Paléolithique

La question du moment à partir duquel l'Homme maîtrise la technique de « production » du feu – par opposition à l'hypothèse de sa « collecte » lors d'incendies naturels et de son entretien dans la durée – est loin d'avoir été clarifiée tant l'histoire de la « domestication » du feu est difficile à documenter archéologiquement et peut s'inscrire dans des *scenarii* divers. Mais que sa production soit maîtrisée dès le départ ou non, et que l'acquisition/diffusion de cette connaissance soit plus ou moins linéaire et pérenne - géographiquement, chronologiquement, démographiquement –, le feu fait indéniablement partie de l'histoire humaine dès le Paléolithique. La récurrence de ses traces

dans les gisements archéologiques, en particulier à partir du Paléolithique moyen, ne permet pas de douter de la fréquence de son utilisation par les groupes préhistoriques. L'importante production scientifique – et artistique – consacrée à l'apparition du feu est significative de la valeur fondatrice que l'on accorde à cette étape de l'histoire humaine. Énergie thermique et source de lumière, le feu contient en substance de multiples possibilités d'utilisation que les Hommes ont rapidement pu explorer : cuisson des aliments (et donc modification de leurs propriétés nutritives), séchage et fumage (permettant entre autre le travail des peaux, la conservation des denrées, l'éloignement des insectes), traitement et transformation des matériaux (roches, travail des bois végétaux et animaux, de l'os, des colorants, préparation de brais), éclairage, chauffage, protection, utilisation comme arme dans le cadre de la chasse, etc. Le « pouvoir » du feu (transformation/création – purification/destruction), ses très nombreuses applications et l'importante fascination qu'exerce la flamme elle-même, ont investi le feu d'une forte charge symbolique dans toutes les civilisations (voir notamment Frazer, 1930 ; Bachelard, 1949) et il est perçu, tant en Orient qu'en Occident, comme un des éléments de base composant la matière. On peut aisément envisager que les sociétés préhistoriques n'échappent pas à cette règle, et qu'au-delà des usages techniques mentionnés (dont certains ne peuvent être documentés archéologiquement et demeurent donc dans le domaine des possibles), le feu ait pu faire l'objet ou participer de pratiques rituelles. Le feu est dès lors au cœur d'un ensemble de pratiques techniques et culturelles qui confèrent au « foyer » un statut particulier ; il constitue « *un lieu privilégié où se croisent les chaînes opératoires de nombreuses activités techniques* » (Taborin, 1989, p.79), ainsi qu'un élément structurant de l'espace social, archéologiquement perceptible dans les occupations du Paléolithique moyen et supérieur (notamment Leroi-Gourhan et Brézillon, 1972 ; Julien 1984 ; Olive et Taborin, 1989 ; Carbonel, 1994 ; Vaquero et Pasto, 2001 ; Meignen et al, 2009). Le feu, probable « *associé indispensable à l'homme dans tous ses actes quotidiens* » (Perlès, 1977, p. 152), et sa mise en œuvre, ont donc toute leur place dans l'étude des modes de subsistance que l'on cherche à reconstituer pour la période préhistorique. Le combustible constitue une ressource nécessaire, qui, à l'instar d'autres matériaux, a pu être recherchée et sélectionnée en vue d'usages particuliers, et dont l'accessibilité dans l'environnement peut être déterminante dans le choix du lieu et la durée d'installation des groupes. Dans cette perspective, l'« économie du combustible », envisagée

en tant que sous-système technique, devient, sous l'impulsion de Théry-Parisot (1998, 2001), un objet d'étude à part entière qui nécessite de reconsidérer un certain nombre d'*a priori* et motive le renouvellement des outils d'analyse. Désormais, le champ d'application de l'anthraco-analyse se situe précisément à la frontière entre « paléoécologie » et « palethnologie », rompant ainsi avec la radicalité des conceptions qui ont animé les recherches jusqu'au début des années 90. Deux schémas de pensée s'opposent alors : une partie des chercheurs soutient l'idée que la collecte du bois doit reposer sur la sélection des essences ligneuses en vue d'usages particuliers, laquelle interdirait les reconstitutions paléoenvironnementales issues de l'analyse des charbons de bois archéologiques (notamment Ford, 1979 ; Smart et Hoffman, 1988) ; la seconde hypothèse admet au contraire que la collecte est fondée sur le « principe du moindre effort », qui suppose que les espèces ligneuses sont prélevées dans l'environnement immédiat du site, en proportions directes de leur abondance dans l'environnement¹ (Prior and Price-Williams, 1985; Shackelton and Prins, 1992). Les travaux de Chabal au début des années 90 ont d'abord défini et restreint le domaine d'applicabilité de « l'hypothèse anthracologique » (Chabal, 1991 – cf. introduction) : les charbons doivent provenir du bois de feu domestique, être représentatifs d'une durée d'occupation longue et faire l'objet d'un plan d'échantillonnage rigoureux et systématique (Chabal, 1991 ; 1992 ; 1994 ; 1997). Moyennant le respect de ces prérequis méthodologiques, l'hypothèse anthracologique, fondée sur la signification écologique indubitable des résultats acquis par les anthracologues, ancre la discipline dans une perspective paléoenvironnementale en détachant la question de la représentativité de l'assemblage anthracologique de celle des pratiques humaines : « *Cette hypothèse ne comprend aucun présupposé sur les comportements d'utilisation du bois de feu domestique au quotidien, mais seulement sur un approvisionnement moyen sur la durée* » (Chabal, 1994, p. 326). Le travail de Chabal ne nie donc pas l'existence de pratiques particulières liées à la gestion du bois de feu, mais affirme simplement que celles-ci n'interdisent pas les reconstitutions paléoécologiques dans le cadre précis des limites méthodologiques qui ont été fixées. Cependant, puisqu'à l'évidence « pratiques » il y a, l'étape suivante consistait logiquement à tenter d'évaluer dans quelle mesure et avec quels

¹ “*In essence the PLE [principle of least effort] assumes that past peoples collected fuelwood that was **closest to the homestead**, and that all species were collected **in direct proportion to their occurrence in the surrounding environment**” (Shackelton and Prins, 1992, pp. 632).*

outils l'anthracologie est à même de les documenter. Le premier apport concerne la remise en question de l'idée d'une collecte sélective des essences ligneuses en fonction de leurs propriétés combustibles et en particulier de la variabilité de leur pouvoir calorifique². Sur le plan conceptuel, Théry-Parisot insiste notamment sur le fait que les notions d'« espèce » et de « bon combustible » ne sont pas directement transposables à la préhistoire. S'il est clair que les hommes de la préhistoire étaient capables de reconnaître les différentes essences et leurs propriétés, en revanche, la « *notion de reconnaissance des espèces a pu revêtir des modalités différentes par le passé* » et le « *concept d'espèce [tel qu'il est envisagé dans nos sociétés] doit être considéré avec précaution* » (Théry-Parisot, 2001, p. 14). La classification botanique actuelle des taxons peut en effet être très éloignée des représentations du monde végétal qu'avaient les groupes de chasseurs-cueilleurs du Paléolithique. Par ailleurs, même en se fondant sur notre propre classification du monde végétal, certains critères ont bien plus d'incidence sur le pouvoir calorifique du bois que le seul choix de l'essence (Théry-Parisot, *ibid.*). À taux d'humidité égal, les différences de PCI (pouvoir calorifique inférieur) entre taxons sont d'environ 10%, tandis qu'une variation de 20% du taux d'humidité entraîne une chute de l'ordre de 25% du PCI quel que soit le taxon (données Ademe, 2001). Un critère tel que l'humidité du bois a donc une incidence considérable sur la conduite du feu. De même, le calibre, l'état phénologique et plus encore physiologique du bois modifient profondément ses propriétés combustibles. Dans les milieux à faible diversité floristique (proche en cela des paysages des périodes les plus froides du Pléistocène) telle la forêt boréale, la variation de l'état physiologique (bois vert, sec ou pourri) de quelques taxons seulement permet aux groupes nomades actuels de répondre à la majorité des besoins (combustion rapide, lente, produisant des flammes ou au contraire beaucoup de fumée, etc.) (Henry *et al.*, 2009 ; Henry 2011). Par ailleurs, si le bois constitue à l'évidence un combustible privilégié (polyvalent et plus ou moins facilement accessible selon le milieu), un usage raisonné de différents types de combustibles est envisagé dès le Paléolithique pour répondre à des besoins/fonctions particulières (Perlès, 1977 ; Théry-Parisot, 2001). Le bois (dont le calibre, l'état phénologique et physiologique varient), mais aussi le lignite, l'os, les

² "Wood appearing in the archaeological record is culturally patterned. Charcoal from a site is an unnatural assemblage. Firewood was not collected at random or in the proportion of the species in the natural environment; some are preferred for particular purposes to the exclusion of others, such as their **heat value** (Graves 1919); some are overrepresented because the species are **better self-pruners**" (Ford, 1979, pp. 305)

végétaux non ligneux ou les excréments animaux constituent une palette de combustibles dont l'usage est attesté dans certains sites (Théry-Parisot et Meignen, 2000 ; Théry-Parisot, 2001, 2002 ; Théry-Parisot et Costamagno, 2005 ; Théry-Parisot et Texier, 2006 ; Costamagno *et al.*, 2009).

De nouvelles voies ont alors été explorées pour tenter de décrypter les modalités de cette gestion raisonnée de l'approvisionnement en matériaux combustibles. On cherche à caractériser, notamment par l'expérimentation, les signatures anatomiques des différents « états » du bois -vert, flotté, sain, altéré- (Théry-Parisot, 1998, 2001, 2002 ; Théry-Parisot et Texier, 2006 ; Allué, 2009 ; Moskal-del Hoyo *et al.*, 2010 ; Caruso-Fermé et Théry-Parisot, 2011 ; Henry, 2011 ; Théry-Parisot et Henry, 2012), son calibre (Marguerie, 1992 ; Marguerie et Hunot, 1997 ; Ludemann et Nelle, 2002 ; Dufraisse 2002, 2006 ; Chravzez, 2006 ; Paradis, 2007, 2012 ; Chravzez *et al.*, 2011 ; Dufraisse et Garcia, 2011), comme l'usage d'autres matériaux que le bois ou les températures atteintes dans le foyer – problématiques ponctuellement partagées avec d'autres disciplines telles l'étude des phytolithes en lien avec la sédimentologie et la micromorphologie notamment – (Brochier, 1996 ; Wattez, 1992 ; Théry *et al.*, 1995, 1996 ; Théry-Parisot et Meignen, 2000 ; Théry-Parisot, 2002 ; Albert *et al.*, 2003, 2012 ; Théry-Parisot et Costamagno, 2005 ; McParland *et al.*, 2007, 2009, 2010 ; Costamagno *et al.*, 2009, 2010 ; Lancelotti et Mandella, 2012).

La seconde voie empruntée est celle de l'ethno-archéologie/ethno-anthracologie (Alix, 1998, 2001 ; Ntinou, 2002 ; Alix et Brewster, 2005 ; Moutarde, 2006 ; Dufraisse *et al.*, 2007 ; Joly *et al.*, 2009 ; Henry *et al.* 2009 ; Henry, 2011). Cette approche, telle qu'elle est envisagée et pratiquée n'a pas pour objectif de créer « *une voie de transfert direct des observations effectuées [au sein des populations actuelles] vers les contextes archéologiques, mais [constitue] un outil permettant d'engager la réflexion à travers l'observation de relations entre les pratiques humaines et le dépôt anthracologique dans un contexte donné* » (Henry, 2011, p. 34). Il s'agit en définitive d'identifier et de comprendre l'organisation et l'incidence des différents paramètres qui peuvent avoir un impact sur la formation et la composition du dépôt anthracologique. En ce qui concerne l'aire d'approvisionnement et le choix des essences, la plupart des exemples ethnographiques indiquent que la collecte du bois de feu s'effectue dans un rayon proche du site d'utilisation – généralement quelques centaines à quelques milliers de mètres –. Le bois sec est globalement préféré, mais du bois vert peut

également être collecté pour l'usage quotidien (ce dernier est en revanche préférentiellement collecté pour mener à bien certaines activités – fumigation par ex. – ou peut servir à moduler la durée et l'intensité de la combustion pour le chauffage et la cuisson notamment). La sélection du bois en fonction de l'espèce existe parfois, mais elle apparaît toujours comme un critère secondaire (Moutarde, 2006 ; Joly *et al.*, 2009 ; Henry, 2011). La préférence ou au contraire l'exclusion de certaines essences sur la base d'arguments symboliques (taxon « favori »/interdit) et culturels (tradition) sont quelquefois notées, mais restent ponctuelles. Ces choix délibérés s'appliquent à une ou quelques essences particulières et ils constituent donc l'exception plus que la norme de la collecte du bois de feu. Il semble ainsi que « *les essences présentes sur le lieu d'approvisionnement soient bel et bien à l'origine de la variation des proportions entre taxons, alors que le 'filtre humain' apparaît comme responsable des distorsions [ponctuelles] entre taxons disponibles et taxons collectés* » (Henry, 2011 p. 175).

L'ensemble de ces avancées conceptuelles, contextuelles et méthodologiques permettent aujourd'hui de mieux appréhender la formation originelle du dépôt anthracologique et balisent progressivement le périmètre interprétatif que l'on peut chercher à occuper.

Sur le plan qualitatif et quantitatif, le dépôt anthracologique est initialement conditionné par une série de facteurs socio-culturels et environnementaux en interactions dynamiques, qui définissent un « système complexe » au sein duquel la taille du groupe, son type de mobilité, la durée et la saison d'occupation du site – induisant en partie le type d'activités qui y sont menées –, déterminent l'importance, la récurrence et la nature des besoins en matériaux combustibles. Ceux-ci sont sélectionnés parmi les ressources disponibles dans l'environnement en fonction de l'usage auquel ils sont destinés et des représentations mentales et symboliques qui lient les groupes à leur milieu. Le dépôt anthracologique doit donc être étudié en prenant en compte la multiplicité des facteurs qui participent initialement de sa formation (nous renvoyons notamment ici aux travaux d'I. Théry-Parisot [1998, 2001 ; Théry-Parisot *et al.*, 2010a] ainsi qu'aux importants développements conceptuels et méthodologiques du travail de doctorat d'A. Henry [2011]). Forte de ces acquis, la démarche anthracologique s'inscrit aujourd'hui dans une perspective plus étendue et probablement plus juste, mais qui n'en reste pas moins ardue. Et ce d'autant plus, qu'au-

delà du contexte « socio-écologique » de formation du dépôt anthracologique qui ne peut être éludé, les charbons de bois résiduels présents dans les sites archéologiques demeurent le fruit d'une réaction chimique d'oxydo-réduction, la combustion, également à même d'influencer la nature du dépôt.

I.1.2. Le processus de combustion : étape constitutive du dépôt anthracologique

La combustion est par définition l'étape constitutive du dépôt anthracologique. Une combustion complète produit uniquement de la cendre. La formation de charbons de bois résulte donc de l'interruption de la combustion à un stade plus ou moins avancé (Trabaud, 1989 ; Vannière, 2001), de manière volontaire ou par manque d'un des trois éléments nécessaires à l'accomplissement de la réaction : le combustible, le comburant et l'énergie d'activation. Dans un foyer ouvert, les premiers résidus solides sont rapidement recouverts par les nouveaux produits et ne sont plus oxygénés. De même, à la périphérie du foyer, la température diminue rapidement. Ce type de combustion produit donc des résidus, dont la quantité varie en fonction de plusieurs facteurs.

Le taux de restes dépend en partie du combustible utilisé, lequel peut renvoyer à l'usage auquel il est destiné : un bois altéré produit beaucoup moins de résidus qu'un bois sain, tandis que les végétaux non ligneux et la bouse qui ne produisent que de la cendre ne sont pas étudiables par l'anthracologie. La combustion mixte os/bois a été testée (Théry-Parisot, 2001 ; Théry et Costamagno, 2005), mais il est très difficile à l'heure actuelle d'envisager les effets de l'usage concomitant de plusieurs types de combustibles ou de plusieurs taxons, dont les compositions chimiques variables peuvent éventuellement influencer le taux de résidus. Même à l'échelle du taxon, la plupart des études expérimentales montrent que le taux de restes peut varier d'une essence à l'autre, selon des facteurs (propriétés physiques et chimiques, structure anatomique, taux d'humidité, température, oxygénation) sur lesquels tous les auteurs ne s'accordent pas (Rossen et Olson, 1985 ; Smart et Hoffman, 1988 ; Scott et Jones 1991 ; Loreau 1994 ; Vaughan et Nichols 1995; Belcher *et al.* 2005 ; Lingens *et al.* 2005 ; Braadbaart et Poole, 2008 ; Théry-Parisot *et al.*, 2010b).

Par ailleurs, on peut également envisager que le taux de restes varie selon la manière dont a été menée la combustion. L'accomplissement de la réaction d'oxydo-réduction dépend

essentiellement des apports en dioxygène et en combustible. Ceux-ci diffèrent si on laisse le feu se dérouler « seul » ou s'il est entretenu (apport régulier de combustible, bois en cours de carbonisation remplacé au cœur du feu, oxygénation par le souffle et le déplacement des braises, etc.). Le type de foyer et son niveau d'aménagement (feu à même le sol, creusement d'une cuvette, installation de pierres sur les bords, etc.) a également une incidence sur le déroulement de la combustion (Perlès, 1977 ; Olive et Taborin, 1989 ; March 1996) en permettant une prise d'air plus ou moins importante.

De même, la localisation du foyer modifie potentiellement les conditions de combustion : un foyer installé dans une zone abritée ou exposée aux vents n'aura pas le même fonctionnement ; par extension, le type de site (cavité / plein air), mais aussi son orientation (exposition aux vents) et la topographie locale peuvent également avoir une incidence sur le résultat.

Du point de vue de l'anthracologue, les résidus solides à l'issue de la combustion proviennent nécessairement des taxons initialement mis au feu, dont l'utilisation dépend en premier lieu de leur présence dans l'environnement local ; ces résidus sont donc représentatifs du milieu sur le plan qualitatif – à moins que certains taxons ne produisent aucun reste, ce qui n'est pas observé expérimentalement –. En revanche, il est possible que la combustion génère des distorsions quantitatives, c'est-à-dire que le taux de restes produit par taxon soit suffisamment variable pour qu'il ne représente que partiellement les proportions initiales des essences mises au feu. Des travaux en cours permettront sans doute prochainement d'approfondir la question de la représentativité quantitative des résidus de combustion, mais quoi qu'il en soit, la cohérence écologique des assemblages anthracologiques (lorsque les conditions de prélèvement et d'échantillonnage sont respectées) va dans le sens d'une faible distorsion des proportions entre taxons.

En définitive, c'est sur l'abondance du dépôt qu'agit en premier lieu le processus de combustion et la variabilité de sa mise œuvre. Le choix du combustible, le type de structure foyère et sa localisation, comme la manière dont est conduite la combustion, renvoient au type d'activité qui est mené, soit à la/les fonctions du foyer (en lien possible avec la fonction du site et sa saison d'occupation) et au mode de transfert de chaleur recherché (conduction, convection, rayonnement). Ces activités sont elles-mêmes en lien avec le contexte environnemental dans lequel elles s'inscrivent, dont relèvent aussi des facteurs tels que la

topographie du site et les conditions atmosphériques et climatiques au moment de la combustion.

Ainsi, l'abondance ou l'indigence des résidus de combustion peut témoigner de pratiques anthropiques particulières, mais leur reconnaissance doit prendre en compte à la fois les facteurs de variabilité du processus de combustion (au moins ceux qui nous sont accessibles) et les différents agents post-dépositionnels auxquels les résidus ont pu être soumis, favorisant, ou au contraire compromettant leur conservation.

I.1.3. Les conditions de la conservation du dépôt anthracologique

La bonne conservation des vestiges archéologiques dépend essentiellement du mode et de la vitesse de formation du dépôt sédimentaire, puis *a posteriori*, de la nature et l'intensité des processus post-dépositionnels. Tous ces processus sont déterminés par les caractéristiques du site (situation géographique, substrat, topographie, hygrométrie, hauteur de la nappe, présence d'un réseau karstique ou fluvial, ouverture et prise au vent, végétalisation, etc.), les conditions environnementales et climatiques, la nature et l'intensité des activités humaines (Texier, 2000).

Plusieurs niveaux de perturbation doivent être distingués : la perte de l'organisation spatiale des vestiges qui entraîne une disparition de l'information « palethnologique », et la dégradation voire la disparition différentielle ou totale des vestiges eux-mêmes, dont les effets vont du biais d'interprétation à l'impossibilité de toute étude.

Les mesures de fabriques, l'étude des remontages et des tris granulométriques, associés aux analyses géomorphologiques et micromorphologiques, permettent notamment d'évaluer l'ampleur des remaniements spatiaux (Cahen *et al.* 1980 ; Goldberg, 1980 ; Van Vliet-Lanoë, 1987 ; Courty *et al.*, 1989 ; Bodu 1990 ; Bordes 2002 ; Bertran et Lenoble, 2002 ; Lenoble et Bertran, 2004 ; Goldberg et Macphail, 2006 ; Bertran *et al.*, 2005, 2006, 2010 ; Karkanas et Goldberg, 2010 ; Mallol et Bertran, 2010). En revanche, la disparition de tout ou partie de la matière est parfois difficile à appréhender ; sa reconnaissance nécessite au préalable une bonne connaissance des caractéristiques et propriétés physico-chimiques des matériaux que l'on étudie comme des processus à l'œuvre dans le gisement.

À l'instar d'autres vestiges, les charbons de bois peuvent être remobilisés par des processus naturels tels que les ruissellements, épisodes torrentiels, le vent, ou les coulées de solifluxion, contribuant ainsi à « vider » - partiellement ou entièrement – les structures de combustion de leur contenu (Thinon, 1992 ; Vaughan et Nichols, 1995 ; Texier *et al.*, 1998 ; Scott *et al.*, 2000 ; Texier, 2006b ; Mallol *et al.*, 2007 ; Lenoble *et al.*, 2003, 2008a, 2009 ; Théry-Parisot *et al.*, 2010a). Celles-ci font aussi l'objet de curages anthropiques, attestés par la mise au jour de vidanges de foyers en contexte archéologique (Patou-Mathis, 1995 ; Schiegl *et al.*, 2003 ; Olive *et al.*, 2004). Les pratiques d'entretien du foyer (qu'il n'est pas toujours aisé de mettre en évidence archéologiquement) par les occupants des sites s'apparentent donc ici aux remaniements « post-dépositionnels ». *A contrario* dans certains cas, c'est précisément l'ampleur de la sédimentation anthropique qui, en favorisant le recouvrement rapide des vestiges, paraît déterminante dans le processus de conservation des structures et des résidus de combustion. Dans la grotte de Kébara (Israël) par exemple, l'importance des dépôts cendreux et charbonneux et leur recouvrement rapide par de nouvelles structures de combustion a empêché leur destruction complète par le piétinement pourtant noté par les analyses micromorphologiques (Bar-Yosef et Meignen, 2007). Ce recouvrement rapide indique que les périodes d'abandon de la grotte sont suffisamment courtes pour que les agents météoriques n'aient pas le temps de détruire les structures (Meignen *et al.*, 2009), assurant également dans ce cas la préservation des charbons de bois. La constance de l'occupation d'une cavité semble jouer un rôle particulier dans le processus de conservation. En effet, lorsque les gisements sont inoccupés par l'homme, d'autres espèces vivantes peuvent y élire domicile. L'occupation par les oiseaux et chauve-souris en particulier génère des accumulations de guano parfois conséquentes. La dissolution du guano par les circulations d'eau et leur infiltration dans les niveaux sous-jacents participent de la dégradation diagénétique des cendres comme cela a pu être mis en évidence dans certains niveaux de Kébara, Hayonim et de la Grotte XVI (Schiegl *et al.*, 1994, 1996 ; Weiner *et al.*, 1995 ; Karkanas, 2002). Au cours de la diagenèse, la présence d'eau riche en phosphates entraîne une transformation minéralogique de la calcite des cendres, progressivement remplacée par des minéraux phosphatés authigènes (dahllite, crandalite, montgomeryte et leucophosphates) (Karkanas *et al.*, 2000 ; Meignen *et al.*, 2001). Ce processus, au terme duquel seuls les « agrégats siliceux » persistent, entraîne une réduction

conséquente du volume du dépôt. Ce mécanisme semble tout à fait déterminant à la Grotte XVI (Karkanas *et al.*, 2002) ; il génère une perte brute d'information en compromettant la lisibilité des structures de combustion, mais participe peut-être aussi de la dégradation des charbons de bois qui ne sont présent dans ce site qu'à l'échelle microscopique. Il semble en effet que la présence de phosphates puisse entraîner une altération diagénétique des charbons eux-mêmes (Cohen-Ofri *et al.*, 2006 ; Rebollo *et al.*, 2008). Ce matériau, longtemps considéré comme chimiquement stable, semble être sensible à l'oxydation, laquelle génère des modifications structurelles (réduction de la phase graphitique et augmentation de la phase amorphe par auto-humification) notamment dépendantes de l'environnement de dépôt (Ascough *et al.*, 2011b). Ces modifications structurelles (cf. chapitre I. § II.3) ont parfois été envisagées comme facteur de conservation différentielle des charbons de bois en lien avec la variabilité intra-site du pH des sédiments. Elles concernent toutefois l'échelle atomique du matériau et il n'est pas démontré qu'elles puissent conduire seules à une réelle dégradation des charbons à l'échelle macroscopique. En revanche, elles doivent pouvoir participer de la fragilisation du matériau et probablement favoriser l'impact des processus mécaniques. Ceux-ci apparaissent comme les premiers responsables de la dégradation des charbons de bois, probablement par hyper-fragmentation, mais leurs effets n'ont été que très peu étudiés. Il est donc difficile *a priori* d'identifier les processus qui ont une incidence telle qu'ils entraînent la disparition du matériel. On peut cependant supposer que les phénomènes induisant de fortes pressions et/ou des mécanismes d'usure comme les processus cryogéniques, les alternances d'imbibition-dessiccation et de retrait-gonflement du sédiment, ou le piétinement lorsque les résidus sont encore à la surface du sol, soient de nature à grandement altérer le dépôt. De même, les charbons de bois pourraient être sensibles à la précipitation des sels minéraux sous leur forme cristallisée ; c'est une des raisons invoquée pour expliquer l'extrême pauvreté des charbons de bois dans les sédiments calcaires du Néolithique ancien de Pınarbaşı en Turquie (Asouti et Austin, 2005). Ainsi que l'admet le Dr. Helbaek cité par Perlès (1977, p. 10) : « *il est possible que la formation de ces cristaux [notamment dans les dépôts de brèche] puisse agir comme désintégrateur* ». Nous avons toutefois pu constater la présence de charbon (certes peu abondant) dans des niveaux de brèche, notamment au Grand Abri aux Puces dans le Vaucluse (dir. L. Slimak).

À l'évidence, de nombreux phénomènes, dont il faut envisager les effets simultanés, peuvent altérer secondairement le dépôt.

I.1.4. Le dépôt anthracologique, résultat de l'interaction de facteurs multiples

Le dépôt anthracologique, tel qu'il est mis au jour au moment de la fouille archéologique, est donc le fruit de l'interaction et l'imbrication de nombreux facteurs (Théry-Parisot 1998, 2001 ; Théry-Parisot et al., 2010a) (fig. 1.).

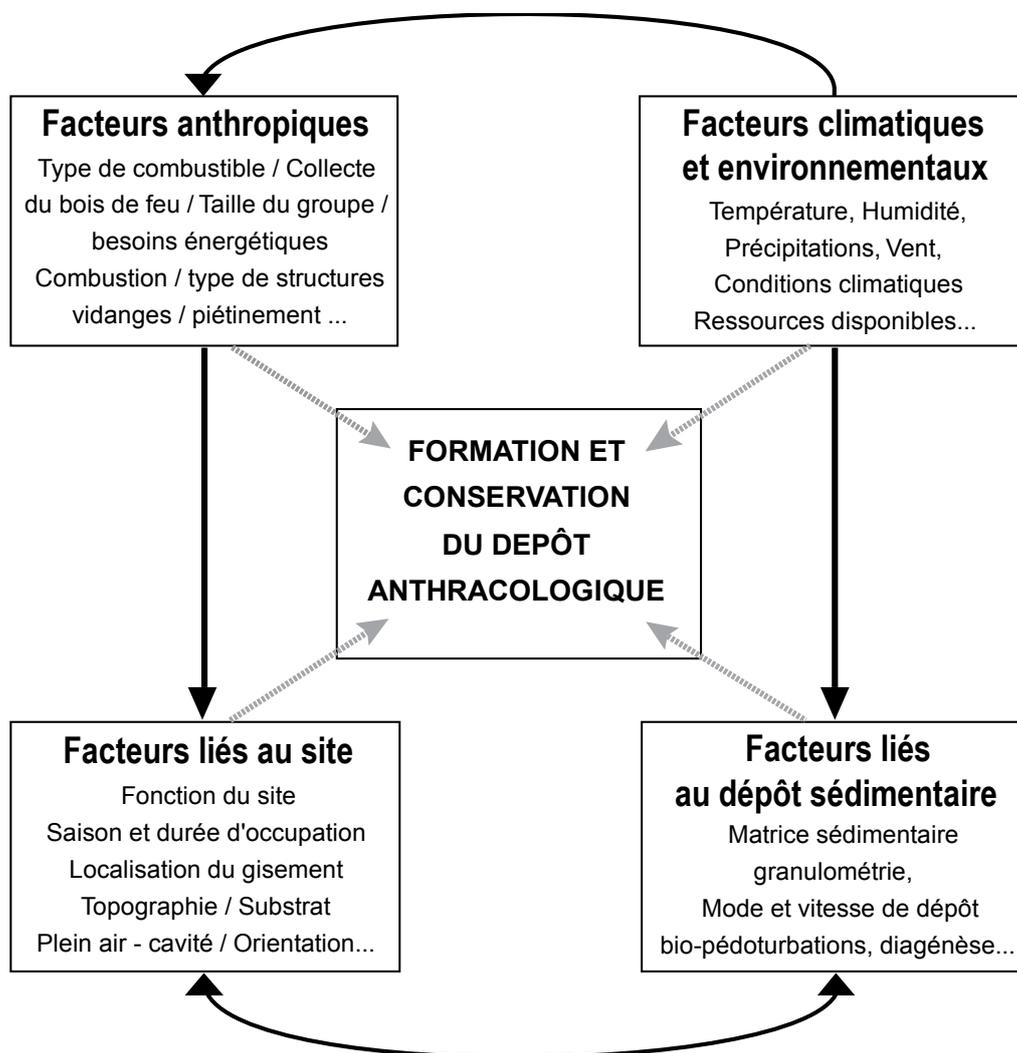


Figure 1: Interactions entre les paramètres incidents sur la formation et la conservation du dépôt anthracologique (d'après Théry et al., 2010a)

Initialement, sa formation (tant sur le plan qualitatif que quantitatif) dépend en grande partie des activités dont il est issu, lesquelles sont en premier lieu déterminées par des paramètres culturels, « démographiques » et techniques. Ces activités anthropiques s'inscrivent et répondent dans une certaine mesure au contexte climatique et environnemental – la flèche unilatérale du schéma ne devant pas être perçue comme l'affirmation d'un déterminisme environnemental, mais seulement comme la non-réciprocité de l'influence entre les sphères anthropiques et climatiques/environnementales pour les périodes qui nous occupent –.

Les « facteurs liés au site » dépendent à la fois de facteurs anthropiques et environnementaux. Ils concernent les caractéristiques du gisement lui-même (topographie, substrat, orientation, etc.) – dont nous avons vu qu'elles peuvent influencer le déroulement du processus de combustion –, mais aussi la manière dont celui-ci a été occupé. La saison, la durée d'occupation et la fonction du site – qui influent sur la disponibilité, la sélection du combustible, le type d'activité et donc la mise en œuvre du processus de combustion – renvoient à l'organisation, la taille du groupe et son type de mobilité, lesquels s'inscrivent dans un contexte culturel, environnemental et climatique donné.

Des caractéristiques du site lui-même et de son mode d'occupation découlent les facteurs sédimentaires, qui agissent essentiellement sur la conservation du dépôt anthracologique. Ils sont également largement influencés par les conditions climatiques et environnementales.

Ainsi, la quantité de charbon résiduelle est dans un premier temps induite par la quantité de résidus produits, soit par des facteurs anthropiques et liés au site lui-même, tous deux influencés par les facteurs climatiques et environnementaux. Dans un second temps, les facteurs sédimentaires assurent la plus ou moins bonne préservation des résidus et agissent donc directement sur la quantité et la qualité finale de matériel étudiable. Ces facteurs sédimentaires, dans lesquels il faut classer les processus post-dépositionnels non anthropiques (les vidanges de foyer et le piétinement constituant des processus post-dépositionnels anthropiques), sont influencés par tous les autres facteurs.

L'interdépendance des paramètres qui, à différents niveaux, selon des temps distincts, déterminent l'abondance et la nature du dépôt anthracologique, permet d'envisager des

situations archéologiques variables. La compréhension du dépôt anthracologique passe par une réflexion intégrant au mieux ces différents paramètres. La reconnaissance des facteurs anthropiques, qui constitue *in fine* l'objectif de l'archéologue, nécessite en amont que les facteurs d'altération post-dépositionnelle aient été recherchés et identifiés. Cette démarche, pourra alors en retour participer de l'appréhension plus générale du contexte archéologique.

I.2. L'observation archéologique

I.2.1. La reconnaissance des facteurs influents en contexte archéologique

Interroger la genèse du dépôt anthracologique en contexte archéologique et essayer de déterminer les facteurs qui ont conduit à son état final de découverte passe nécessairement par la reconnaissance de la part imputable aux processus post-dépositionnels, dont les effets réels sont encore largement méconnus. Aussi, pour prendre la mesure de l'incidence des processus post-dépositionnels sur le dépôt anthracologique, l'observation des situations archéologiques existantes paraît indispensable : existe-t-il des constantes conduisant à la dégradation du matériel ?, des milieux sédimentaires dans lesquels la conservation est toujours compromise ?, les effets de certains processus particuliers sont-ils particulièrement dommageables pour les charbons de bois ? La réalisation d'un travail de synthèse est compliquée à la fois par la nécessaire prise en compte des facteurs multiples que l'on vient d'évoquer et surtout par l'hétérogénéité de la donnée disponible, voire l'absence pure et simple d'information.

En effet, lorsque des charbons de bois sont présents dans les dépôts et plus encore si ceux-ci ont fait l'objet d'analyse, il en est généralement fait mention dans les publications. En revanche, l'absence de charbons de bois macroscopiques n'est généralement pas relevée explicitement dans la littérature. Lorsque la présence de charbons de bois n'est pas mentionnée dans la publication d'un site, plusieurs interprétations sont alors possibles : i) les charbons sont absents, ii) les charbons n'ont pas été recherchés (même si leur recherche est aujourd'hui heureusement relativement systématique, le doute persiste, notamment pour les fouilles anciennes), iii) la stratégie de recherche et de prélèvement des charbons de bois n'était pas adaptée et n'a pas permis d'atteindre son objectif (la connaissance seulement

partielle des protocoles de prélèvement des charbons de bois par les archéologues n'est pas exceptionnelle), iv) les charbons sont rares ou très fragmentaires et/ou n'ont simplement pas fait l'objet d'analyse. Il faut préciser également que la présence de structures de combustion identifiées ne signifie pas nécessairement la présence de charbons de bois, et inversement. Or, il est clair que l'identification des structures a longtemps été une préoccupation prioritaire des archéologues. Heureusement la « popularisation » de l'apport paléoenvironnemental de l'antraco-analyse vient aujourd'hui rétablir un certain équilibre et les charbons font l'objet de plus d'attention, même en l'absence de structure de combustion identifiable.

Enfin, faire la part de l'incidence des facteurs anthropiques et des processus post-dépositionnels suppose que le site ait à la fois fait l'objet d'analyses pluridisciplinaires poussées permettant de rendre compte du type d'occupation (durée, intensité, site résidentiel ou spécialisé, chronologie, analyses paléoenvironnementales et saisonnalité, etc.), mais aussi et surtout que le processus de formation du dépôt soit précisément étudié, intégrant une perspective taphonomique, et croisant si possible géomorphologie et micromorphologie, voire granulométrie, minéralogie et analyses géochimiques. À l'évidence, tous les sites ne permettent pas d'appréhender les étapes de formation et de conservation du dépôt anthracologique, ni de conclure sur les raisons de l'indigence ou l'absence éventuelle des charbons de bois. Il nous semble toutefois nécessaire d'affirmer que l'absence ou la mauvaise préservation des résidus anthracologiques dans un site archéologique est une information en soit, qui doit au moins être relevée et interrogée. Considérée à l'aune des facteurs que nous avons évoqués plus haut, la recherche des causes de l'indigence ou de l'absence de résidus est une démarche qui recèle un potentiel informatif important. Celle-ci pourra participer à la compréhension de l'histoire générale de l'occupation du site en ce sens qu'elle constitue un élément de plus permettant de raisonner en termes d'activité, de fréquence, de durée, de densité et de mode d'occupation. De même, l'indigence ou l'absence de résidus doit être interrogée en termes de conservation des dépôts archéologiques, elle participera alors de la reconstitution de l'histoire taphonomique du site, indispensable et préliminaire à toute interprétation d'ordre anthropique. À termes, la plus ou moins bonne préservation des charbons de bois pourrait, dans certaines circonstances revêtir un caractère diagnostique de processus post-

dépositionnels donnés, au même titre que l'orientation préférentielle des vestiges, l'étude des fabriques, les remontages entre niveaux archéologiques, etc.

La présence ou l'absence de charbons de bois doit au minimum être interrogée au-delà de la perte ou de la préservation du potentiel de reconstitution paléoenvironnementale que représente ce matériau.

Quelques cas types peuvent être détaillés pour illustrer notre propos. Ils mettent en lumière la diversité des situations archéologiques et l'apport de la mise en œuvre d'études fines concernant la conservation des résidus de combustion. Dans un deuxième temps un certain nombre de processus post-dépositionnels peuvent être identifiés comme étant potentiellement actifs sur les résidus carbonisés.

1.2.2. Variabilité de la conservation des charbons de bois dans les gisements du Paléolithique : quelques exemples

La présence dans un site paléolithique de charbons de bois nombreux et bien préservés est *a priori* le résultat de la conjonction entre une occupation au cours de laquelle l'usage du feu est fréquent (site résidentiel dont la durée d'occupation est relativement longue et où les activités sont variées – site spécialisé saisonnier, ayant pour vocation la réalisation d'activités particulières nécessitant l'usage du feu), et de conditions de conservation particulières.

Les sites du Proche-Orient illustrent souvent assez bien cette catégorie. Certains d'entre eux présentent notamment la particularité d'avoir conservé non seulement les charbons de bois, mais aussi les niveaux cendreux qui les accompagnent, ce qui est tout à fait exceptionnel dans les gisements européens. **Le site de Kébara** que nous avons déjà évoqué en est un bon exemple. Situé sur le Mont Carmel (Israël), la séquence s'étend du Paléolithique moyen à l'âge du Bronze. Les niveaux du Paléolithique moyen sont datés entre 60 et 49 000 ans. La sédimentation anthropique est responsable de la majeure partie du dépôt, notamment constitué de très nombreuses structures de combustion polyphasées, imbriquées horizontalement et verticalement sur plusieurs mètres d'épaisseur (Meignen *et al.*, 2001, 2009 ; Bar-Yosef et Meignen, 2007).

Toutes les études suggèrent que le site de Kébara a fonctionné comme un camp de base, occupé de manière répétitive sur d'assez longues périodes pouvant s'étendre sur plusieurs saisons (consécutives ou non), dans lequel se déroulaient des activités intenses et diversifiées et en particulier le traitement et la consommation des gibiers (Speth et Tchernov, 2001 ; Meignen *et al.*, 1998 ; Bar-Yosef et Meignen, 2007).

Si les analyses micromorphologiques et minéralogiques ont mis en évidence l'existence de phénomènes de piétinements, bioturbations, remaniements par l'eau et phosphatisation (Schiegl *et al.*, 1994, 1996 ; Goldberg *et al.*, 2007 ; Weiner *et al.*, 2007) l'intensité de l'occupation, et en particulier le recouvrement rapide des structures par de nouveaux épisodes de combustion, semble avoir grandement participé à la conservation des structures de foyers avec superposition de niveaux organiques charbonneux et de niveaux de cendres, ainsi que nous l'avons évoqué plus haut. Le contexte géographique méditerranéen favorise une bonne préservation des résidus : le processus de mise en place des dépôts naturels de l'unité, caractérisé par une sédimentation régulière, essentiellement le fruit d'apports éoliens, combinés aux apports anthropiques (Bar-Yosef *et al.*, 1992 ; Goldberg *et al.*, 2007), participe du niveau de conservation exceptionnel noté dans ce gisement.

Dans le même type d'environnement, un second site, certes de chronologie plus ancienne, présente un niveau de conservation tout à fait différent. **La grotte d'Hayonim**, située sur les collines de Galilée occidentale contient une séquence moustérienne datée entre 230 et 160 000 ans. Dans la couche E, des accumulations de cendres attestent là aussi d'activités de combustion importantes. Pourtant, les structures elles-mêmes ne sont que partiellement conservées et les charbons de bois ne sont visibles qu'en lames minces. Les études minéralogiques montrent des modifications diagénétiques importantes et localisées dans ce niveau (Schiegl *et al.*, 1996 ; Weiner *et al.*, 2002) ainsi que des phénomènes de bioturbations et de piétinements contribuant à l'homogénéisation des sédiments. Des processus post-dépositionnels de même nature sont visibles à Kébara, mais les structures et les résidus carbonisés y sont bien présents ; ces processus ne suffisent donc pas à expliquer les différences de conservation notées entre les deux gisements.

Le volume des dépôts résultant des activités de combustion est beaucoup moins important à Hayonim. Des analyses phytolithiques ont été entreprises qui ont mis en évidence l'abondance de feuilles de dicotylédones accompagnées de bois et d'écorce. Cet assemblage

phytolithique, associé à la présence de boulettes d'argile rouge cuite est interprété comme l'utilisation d'un combustible constitué de branchages et de buissons poussant dans la « terra rossa » – résidu de l'altération des calcaires constituant le substrat local autour de la grotte – et donc prélevé dans l'environnement immédiat du site (Albert *et al.*, 2003). Les autres données archéologiques disponibles pour ce site (lithique, faune, données spatiales) montrent par ailleurs une densité d'occupation bien inférieure à celle de Kébara et semble indiquer des durées d'occupation brèves et/ou concernant de petits groupes (Meignen *et al.*, 2009), séparées par des laps de temps importants. À ce type d'occupation seraient donc associés de faibles besoins énergétiques que le prélèvement d'une ressource (buissons et branchages) immédiatement disponible à proximité suffit à combler. Un mode de collecte du bois de feu dit « opportuniste » – quoique pouvant être qualifié d'« efficace » (cf. Henry, 2011) dans la mesure où il est adapté aux besoins générés par le type de mobilité et d'installation du/des groupes concernés –, conduisant à l'utilisation d'une ressource produisant peu de résidus charbonneux au cours d'occupations de courte durée et non continues permet en partie d'expliquer la faible préservation des structures et l'absence de charbons de bois étudiables.

Si les processus post-dépositionnels identifiés contribuent également à altérer le dépôt, l'absence de résidus est ici à mettre en lien en premier lieu avec des facteurs anthropiques. Notons par ailleurs que les études mises en œuvre pour comprendre la mauvaise préservation des structures et des charbons de bois et l'identification du combustible utilisé fournissent en retour un argument supplémentaire permettant d'aborder la question des comportements humains et leur variété au cours du Paléolithique moyen.

En Europe, si les structures de combustion de ce type (alternance de niveaux charbonneux et cendreaux) sont extrêmement rares, la présence de charbons de bois n'est pas exceptionnelle à partir du Paléolithique moyen, même si les restes semblent plus fréquents au Paléolithique supérieur. Cependant, les dépôts sont en termes d'abondance très hétérogènes.

Parmi les gisements moustériens, un certain nombre de sites présentent suffisamment de charbons de bois pour avoir fait l'objet d'études paléobotaniques. On citera Königsau et Schafstall en Allemagne ; Moravsky Krumlov, Kulna, Mujina Pecina, Divje babe en Europe du centre et de l'est ; Remicourt en Belgique ; la Grotta di Fumane et Castelcivita en Italie ; Gorham's Cave, El Castillo, Buena Pinta, Camino, l'Abric Romani en Espagne ; Le Lazaret, Pié

Lombard, La Combette, St Marcel, Les Canalettes, Le Grand Abri aux Puces, La Grotte Moula, Esquicho-Grapaou en France, ou encore les niveaux supérieurs de l'Abri Pataud, La Salpêtrière, l'Abri de la Laouza ou la Grotte Bouyssonie, etc., pour le Paléolithique supérieur. Ces quelques gisements ne constituent évidemment pas une liste exhaustive. Cependant, si cette énumération montre d'emblée que des assemblages anthracologiques, même anciens, sont disponibles à l'étude sur tout le continent européen, un certain nombre de sites en revanche sont remarquables par le contraste qu'ils présentent entre l'abondance de résidus témoignant de l'usage du feu (silex et pierres chauffées, os brûlés, cendres) et l'indigence ou l'absence des restes anthracologiques. Parmi ceux-ci, on compte Pech de l'Aze IV (charbons absents ou <2mm selon les niveaux ; Dibble *et al.*, 2009), la grotte des Pêcheurs (charbons petits et rares ; Roebroeks et Villa, 2011), la Grotte Mandrin (rares fragments très localisés ; nos observations), l'Abri du Maras, la Baume des Peyrards, Jonzac, la Quina, St Cézaire, Isturitz, ainsi que la Grotte XVI dans laquelle les charbons sont présents sous forme macroscopique dans les niveaux holocènes, mais très peu représentés ou sous forme essentiellement microscopique dans les niveaux pléistocènes (Rigaud *et al.*, 1995). On ajoutera les niveaux aurignaciens de l'Abri Pataud et la Grotte Castanet où les charbons macroscopiques sont présents, mais en faible abondance (Théry-Parisot, 1998, 2002) alors que les charbons microscopiques sont fortement représentés (Marquer, 2010).

À **Pech de l'Aze IV**, le niveau 8 (niveaux X, Y et Z de Bordes) contient des traces évidentes de l'usage du feu (silex et os brûlés ou chauffés, fragments de charbons en faible quantité, présence de cendres) et des structures de combustion y sont en partie conservées (synthèse concernant ce niveau : Dibble *et al.*, 2009).

La flottation de 100 litres de sédiment a permis d'extraire seulement 460 fragments de charbons généralement <2mm et dont seulement 159 sont identifiables sur le plan taxonomique. Même en lame mince, les charbons sont petits (<0.25mm) et moins représentés que les os brûlés. L'utilisation de l'os comme combustible et/ou pour le nettoyage de la zone d'habitat avec rejet au feu semble attestée (selon le modèle de Costamagno *et al.*, 2009), mais l'on ne peut pas ici envisager cela comme un recours venant pallier le manque de bois dans l'environnement. D'une part, les études expérimentales ont montré que l'alimentation des foyers en os nécessite un apport en grande quantité et qu'en ce sens la ressource osseuse n'est pas plus « disponible » que la ressource ligneuse (Théry-

Parisot et Costamagno, 2005) ; d'autre part, les quelques fragments de charbon qui ont pu être identifiés mettent en évidence un environnement boisé. Les analyses sédimentologiques, géologiques, archéozoologiques et les datations absolues permettent d'attribuer le dépôt du niveau 8 à une phase tempérée de l'OIS 5 (probablement 5c) au cours de laquelle la ressource ligneuse était accessible. La très faible représentation des charbons de bois ne peut en aucun cas être mise en relation avec un manque de bois. De même, les analyses interdisciplinaires (géologie, micromorphologie, analyse des fabriques et orientation des pièces longues, etc.) montrent que le niveau n'a pas subi de remaniement post-dépositionnel de grande envergure (ruissellement réduit, absence de processus cryogéniques) ni d'altération diagénétique contrairement aux sites précédemment mentionnés. En revanche, les analyses micromorphologiques mettent en évidence l'incidence du piétinement sur les résidus de carbonisation et l'altération des structures de combustion (compaction des cendres, fragmentation des os brûlés, des charbons et des blocs de cendres consolidés). Des remaniements intentionnels (vidange de foyer) sont également envisagés, les cendres (et une partie des charbons de bois ?) pourraient alors avoir été remobilisées, notamment par le vent.

Le piétinement, couplé à des occupations – et donc des activités liées au feu – peu intensives, pourrait dans le niveau 8 de Pech IV expliquer en partie la disparition partielle des charbons de bois.

Si le site de Pech de l'Azé IV n'est pas affecté par les processus périglaciaires, en revanche, de nombreux gisements de la région dans lesquels les charbons de bois sont rares, présentent des traces importantes de l'activité du gel. C'est le cas dans le Périgord de la grotte Vaufrey, du Pech de l'Azé I, de l'Abri Pataud ou de la grotte XVI notamment.

Les gisements, mais aussi les niveaux d'un même site livrent des taux de résidus hétérogènes.

L'Abri Pataud présente l'intérêt d'avoir fait à la fois l'objet d'une analyse anthracologique (Théry-Parisot, 1998 ; 2002) et d'une étude précise de la mise en place des dépôts (Farrand, 1975, 1995 ; Agsous *et al.*, 2006 ; Agsous, 2008). Qui plus est, la variation du rapport micro-charbons d'os/micro-charbon de bois a été précisément étudié par L. Marquer (2010). D'après Théry-Parisot, les charbons de bois sont abondants dans les niveaux 2, 3, 7 et 8, alors qu'ils sont rares dans les niveaux inférieurs 9 à 14. Ces derniers

appartiennent à la partie inférieure de l'Unité f de Farrand (unité VII de Lenoble et Agsous). Cette unité se caractérise par une stratification du dépôt alternant lits caillouteux et matriciels. Les lits caillouteux sont granoclassés et montrent une orientation préférentielle. Tous ces traits désignent la solifluxion à front pierreux comme agent majeur de la sédimentation de cette unité. Des dépôts intercalés à stratification rudimentaire mis en place par charriage torrentiel sont à mettre en relation avec le fonctionnement du cône détritique en marge duquel s'inscrit le site (Agsous *et al.*, 2006). Les niveaux 7 et 8 appartiennent à l'unité VI de Lenoble et Agsous ; cette unité est caractérisée d'une part par des dépôts à support clastique, non triés, hétérométriques et dont les éléments sont diversement orientés et d'autre part par l'effondrement de bancs de rocher détachés du toit de la grotte. La base de l'unité seulement est reprise par solifluxion.

Les niveaux 2 et 3 correspondent à l'unité III de Lenoble et Agsous (partie inférieure de la strate a de Farrand). A la base, un lithofaciès de cailloux et de plaquettes colmatés, associés à une lamination de sables et de limons atteste d'un dépôt de ruissellement. La présence de microstructures habituellement produites dans les horizons supérieurs des cryosols indique un épisode de gel contemporain du dépôt. Un second lithofaciès de dépôts bien stratifiés semblable à celui observé au sein de l'unité 7 témoigne d'une redistribution par des coulées de solifluxion à front pierreux. L'unité est partiellement affectée par des phénomènes de cryoturbation (Agsous *et al.*, *ibid.*). Le mode de dépôt de ces unités et les remaniements postérieurs notés impliquent un niveau de perturbation des couches archéologiques hétérogène. Les niveaux 6 à 8 n'ont probablement pas subi de remaniements significatifs ; en revanche les niveaux 2 et 9 à 14 contenus dans les dépôts issus des coulées de solifluxion à front pierreux ont subi des phénomènes de cryoexpulsion et cryoreptation ainsi qu'une redistribution horizontale d'une partie des vestiges. Par ailleurs, la mise en place d'une partie de l'unité 7 par charriage torrentiel a pu générer un tri des vestiges et un emport à l'extérieur du site (Agsous *et al.*, *ibid.*).

Du point de vue anthracologique, le niveau 2 livre beaucoup de charbons, alors que les niveaux 9 à 14 sont pauvres. Les deux unités sont marquées par la solifluxion qui a clairement pu affecter les dépôts, mais qui ne suffit donc pas à expliquer les différences de conservation notées entre les niveaux. Celles-ci sont à ramener soit à des pratiques

anthropiques différentes, soit à la surimposition d'autres facteurs post-dépositionnels dans les niveaux inférieurs.

Dans son travail de doctorat, Théry-Parisot a montré qu'une sous-exploitation du bois au profit de l'os a eu lieu dans les niveaux inférieurs de Pataud (Théry-Parisot, 1998, 2002). Par ailleurs, le charriage torrentiel mis en évidence dans l'unité 7 peut éventuellement avoir participé de la disparition d'une partie des résidus. De même, un phénomène de décarbonatation et d'altération des argiles affecte les niveaux de l'unité 7. L'importance des processus post-dépositionnels et diagénétiques, associés à une gestion différentielle des combustibles entre les niveaux supérieurs et inférieurs, permet dans l'Abri Pataud d'expliquer la conservation hétérogène des résidus anthracologiques.

I.2.3. Récurrence des processus, récurrence des effets ?

Si les phénomènes cryogéniques ne suffisent pas toujours seuls à expliquer la disparition ou l'importante altération des charbons de bois, il est symptomatique que les gisements où les marques du gel sont les plus marquées soient également pauvres en résidus de carbonisation ou, inversement, que les sites qui présentent un meilleur niveau de conservation des résidus ne soient pas affectés par les phénomènes cryogéniques. L'activité du gel est notamment extrêmement prononcée au Pech de l'Azé II et joue un rôle majeur dans la mise en place d'une partie du dépôt, lequel est ensuite affecté postérieurement par la formation d'un gélisol profond. Les involutions importantes notées dans les unités 2 et 4 sont liées à la fonte des gélisols dont les développements successifs semblent se produire au cours du stade 6 puis au cours du stade 4 ou 2 (Texier, 2006a). Deux importantes phases de cryoturbation sont également visibles à la Grotte XVI, correspondant à la fonte de gélisols qui semblent s'être développés l'un au cours du Bölling-Alleröd et l'autre au cours du Dryas supérieur (Texier, *ibid.*).

Il est important de préciser que si l'on a longtemps considéré que l'extension du permafrost au cours des phases les plus froides du dernier cycle glaciaire n'avait pas concerné la région Atlantique, des données récentes acquises en Aquitaine suggèrent qu'au moins trois épisodes d'extension d'un pergélisol se sont produits dans cette région au cours des derniers 40 000 ans (Texier et Bertran, 1993 ; Texier, 1996 ; Bertran *et al.*, 2009b, 2012 ; Lenoble *et*

al., 2012). Ces épisodes de gel profonds ont pu contribuer à détruire ou altérer les charbons de bois dans nombre des gisements de la région. L'intensité de l'expression des phénomènes cryogéniques dépend de la matrice sédimentaire, et notamment de la plasticité du sédiment. La forte présence des argiles, et en particulier des smectites à fort pouvoir gonflant, dans une partie des dépôts de la Grotte XVI doit de ce point de vue être notée. Dans ce même gisement, des phénomènes de phosphatisation sont également relevés (notamment dans l'unité inférieure VII – Kervaso et Texier, 2009-2010 ; Karkanas *et al.*, 2002). Il faut donc bien sûr envisager l'action de processus dépositionnels, post-dépositionnels et diagénétiques multiples dans certains gisements qui, ajoutés aux autres facteurs (activité anthropique, intensité de l'occupation, combustion, vitesse de recouvrement des dépôts), génèrent différents niveaux d'altération des résidus au sein des sites.

Plusieurs types de processus sont donc susceptibles d'agir sur les dépôts anthracologiques. Ruissellements, bioturbations (insectes, vers, animaux fouisseurs, tissu racinaire), cryoturbations, pressions mécaniques (cycles gel-dégel, retrait-gonflement du sédiment, piétinement) et processus diagénétiques peuvent être identifiés comme des facteurs potentiels d'altération du matériau et de modification des assemblages. Toutefois, à travers les exemples que nous avons développés, nous avons vu que **des processus dépositionnels et/ou post-dépositionnels de même nature au sein de sites différents ou dans les niveaux d'un même site, peuvent conduire à des états de conservation des charbons de bois inégaux**, sans rapport apparent avec les activités humaines. Quel que soit le processus considéré, des exceptions et contre-exemples sont toujours mis en évidence et aucun processus n'est identifié comme facteur de dégradation systématique du matériel, confirmant ainsi que la conservation ou la dégradation du matériau charbon de bois est un phénomène complexe.

Afin d'évaluer l'impact direct et unique des processus identifiés comme facteur d'altération, il est nécessaire de tester le comportement des charbons de bois en situation. Mais en premier lieu, et bien que les données documentant les effets des processus post-dépositionnels sur les charbons de bois soient rares, quelques travaux spécifiques à

l'anthracologie ou issus d'autres disciplines permettent d'avoir une idée de l'incidence d'une partie au moins des processus taphonomiques sur le matériel anthracologique.

II. IMPACT DES PROCESSUS POST-DÉPOSITIONNELS SUR LES CHARBONS DE BOIS, ÉTAT DES CONNAISSANCES

II.1. Bioturbations

Les phénomènes de bioturbation sont envisagés de longue date. L'activité des lombrics et leurs effets sur les sols en particulier, ont été étudiés dès la fin du XIXe siècle par Darwin (1881). Depuis, de nombreuses études ont complété et prolongé ces travaux pionniers, avec des focales différentes. Certaines sont précisément axées sur l'ampleur des perturbations induites dans les niveaux archéologiques (Stein, 1983 ; Amour-Chelu et Andrew, 1991 ; Canti, 2003), d'autres se placent dans une perspective plus large (agronomique, écologique, pédologique) (Johnson, 2002 ; Meysman *et al.*, 2006). Les vers anéciques creusent leurs galeries en ingérant les particules du sol inférieures à la taille de leur orifice buccal, celles-ci sont remontées en surface et rejetées sous forme de turricules. Les charbons de bois peuvent donc ainsi être déplacés verticalement au sein des couches archéologiques.

L'expérimentation menée par M. Thinon dans sa thèse de doctorat (1992) montre qu'à l'issue d'une année d'enfouissement, des charbons de bois apparaissent à la surface ; les particules mesurent 1,3 à 1,6mm. D'après Carcaillet et Talon (1996), le processus de déplacement peut concerner des charbons de 2,5mm, tandis que M.-G. Canti estime que la taille des particules potentiellement transportées par les lombrics est comprise entre 200µm et 5mm ; les mouvements sont de l'ordre de 1 à 10mm par an (Canti, 2003). La profondeur atteinte par les galeries est différente en fonction des espèces et du type de sol ; on trouve diverses valeurs dans la littérature, les plus hautes estimations atteignant jusqu'à 6m de profondeur dans les terres noires. La question de l'altération des charbons de bois induite par leur ingestion n'est pas claire. D'après Carcaillet et Talon, elle serait inexistante (1996), tandis que Stein (1983) indique des processus d'altération et/ou de fragmentation.

Des insectes, tels les fourmis, les termites ou certaines larves peuvent également contribuer à remanier les sédiments et déplacer les charbons de bois. Ce type de perturbation, tout à fait anecdotique sous nos latitudes, sera par contre à prendre en considération dans d'autres contextes, en particulier en milieu tropical (McBrearty, 1990). Quant à l'action des animaux fouisseurs, bien connue des archéologues, elle induit évidemment des déplacements de matériel et reste problématique, même si les creusements de terriers et galeries sont généralement repérables lors de la fouille et les zones remaniées exclues du prélèvement. Notons toutefois que le phénomène est fréquent et d'après J.-B. Mallye (2007), chaque site est susceptible d'avoir été affecté par ce type de bioturbation, même au cours des périodes les plus froides.

L'action racinaire est sans doute plus problématique pour les charbons de bois. Ceux-ci, du fait de leur fort pouvoir absorbant vis à vis des composés humiques et ioniques du sol sont nutritivement très attractifs pour les végétaux (Carcaillet et Talon, 1996). Ils sont alors piégés et fragmentés par les racines et radicelles. La fragmentation par les racines pourrait, d'après Thinon (1992), être plus importante dans le cas de taxons à zone poreuse ou à canaux résinifères. Les racines des végétaux supérieurs peuvent avoir une action mécanique importante sur les charbons de bois, et également déplacer les particules en profondeur. Dans les sols forestiers, la datation des charbons de bois est sans rapport avec la stratigraphie ; le déplacement des particules est alors évident. Il est mis en relation avec l'activité racinaire et de la pédo-faune, ainsi qu'avec des épisodes de chablis qui modifient durablement et en profondeur la structure du sol par un abrupt remaniement particulière (Carcaillet, 2001).

Tous les phénomènes de bioturbation peuvent avoir une incidence considérable dans les séquences naturelles ou dans les sites de plein air. Si leur importance dans les cavités peut a priori sembler plus ponctuelle, la hauteur et la largeur du porche, le taux de luminosité pénétrant à l'intérieur, le degré d'humidité, etc., sont des facteurs qui favoriseront ou non l'activité biologique au sein d'une grotte. L'activité biologique n'est donc pas à exclure en contexte de cavité. Lorsqu'elle existe, elle affecte essentiellement les niveaux de surface et elle est généralement repérable. Elle a toutefois également pu affecter les niveaux plus profonds, lorsque ceux-ci constituait la surface du sol et les traces n'en sont pas toujours évidentes. D'après Courtin et Villa (1982), on peut supposer l'action des racines,

même dans les couches où elles n'ont pas été observées. La physionomie et les caractéristiques de la grotte elle-même (actuelle présence de végétation, phase d'effondrement de la voûte et d'ouverture de la cavité) et l'analyse micromorphologique des dépôts permettent d'envisager l'importance de l'activité biologique. De même, on se méfiera des entrées de grottes, dans lesquels la végétation proche peut induire des mouvements de matériel en profondeur. Dès lors que des racines ou traces de racines sont visibles, les prélèvements de charbons de bois (en particulier destinés à la datation) sont à proscrire absolument.

II.2. Transport par l'eau et le vent

Les mécanismes de transport des charbons par l'eau et le vent sont principalement étudiés par les pédo-anthracologues. Les observations sont donc réalisées en extérieur, le plus souvent après des incendies naturels et les facteurs tels que la déclivité du terrain ou la végétalisation sont alors déterminants. Il n'existe pas d'étude en contexte de grotte ou d'abri, mais ces phénomènes y sont sans doute de moindre importance. Toutefois, des phases d'érosion d'envergure sont parfois identifiables dans les grottes, qui peuvent être liées aux circulations d'eau, à la reprise d'activité du réseau karstique etc. Encore une fois, les caractéristiques propres de la cavité seront déterminantes et devront être prises en considération.

Le transport par voie atmosphérique concerne essentiellement les particules de quelques centaines de microns. Sous des vents très forts, le déplacement pourrait concerner des charbons de 1-2mm et jusqu'à 4mm, mais sur de faibles distances. Les éléments transportés sont principalement ceux qui n'ont pas les caractéristiques anatomiques du bois (feuilles, aiguilles de feuillus, écorce, fleurs et fruits) (Clark, 1988 ; Thinon, 1992 ; Scott, 2000).

Le transport par l'eau induit des migrations horizontales et verticales des charbons de bois. La présence de charbons dans les séquences marines montre bien que des transports sur de longues distances sont possibles. En cas de précipitations violentes et surtout sur les terrains à forte déclivité, les charbons peuvent atteindre les réseaux fluviaux et ainsi, être

transportés jusqu'à la mer. Le temps de flottation des particules et consécutivement, la distance de transport, est variable en fonction de la température de combustion, de la taille des fragments, des parties végétales transportées et du taxon (Thinon, 1992 ; Vaughan et Nichols, 1995 ; Scott *et al.*, 2000).

Sur des pentes à faible déclivité, le transport s'effectue sur de courtes distances de l'ordre de quelques dizaines de mètres. De plus, lorsque la végétation est présente en aval, le transport est stoppé. Les très grosses particules trop lourdes ne sont pratiquement pas affectées par ce type de transport (Thinon, 92). Cependant, l'eau peut mobiliser des particules de plusieurs millimètres ; celles-ci sont plus difficiles à mobiliser, mais elles flottent ensuite plus longtemps. D'après Vaughan et Nichols, les fragments entre 1 et 2mm mettront 5 fois plus de temps pour sédimenter que celles inférieures à 1mm. Pour le pédo-anthracologue, ces informations sont d'une importance majeure puisqu'elles indiquent qu'un tri peut avoir été opéré parmi les charbons de bois, venant potentiellement biaiser l'échantillon. En contexte archéologique, ce même tri pourra s'opérer dans un site de plein air, toutefois, l'analyse ne concernant alors que les fragments supérieurs à quelques millimètres (contrairement aux pédo-anthracologues, pour qui les micro-charbons constituent souvent le matériau d'étude principal), cela aura moins d'incidence. Dans les cavités, s'il faut bien sûr envisager qu'une partie du matériel ait pu être expulsée à l'extérieur du site, les déplacements lorsqu'ils ont lieu, se produisent majoritairement à l'intérieur même du site, n'induisant pas alors de conséquence majeure du point de vue de l'information paléoécologique. En revanche l'information ethnobotanique est perdue (Théry-Parisot, 2001). Il est nécessaire de préciser que les travaux dont nous faisons mention ici sont tous spécifiques à la pédo-anthracologie ; ils ont pour objectif de comprendre le mode de formation des séquences naturelles et d'en évaluer la pertinence paléoécologique. Ces travaux répondent donc à une problématique tout à fait particulière. Les études sur le déplacement des vestiges par ruissellement en contexte archéologique montrent au contraire que toutes les classes de tailles de vestiges sont concernées. Le déplacement dépend du type de ruissellement, du pendage, de la force et la vitesse d'écoulement et surtout de sa durée (Lenoble, 2003). Le tri granulométrique et la formation de nappes de vestiges peut résulter de l'action du ruissellement. À n'en pas douter, si les artefacts de silex peuvent être mobilisés, les charbons de bois, matériau poreux et doué d'une forte

flottabilité, le sont aussi. Les concentrations de charbons hors structures doivent donc être interprétées avec prudence et la micromorphologie sera ici encore un recours indispensable pour comprendre la mise en place des dépôts et le sens des accumulations observées. Pour le géoarchéologue, la dispersion de particules anthropiques (notamment les charbons) au sein d'un sédiment naturel participe d'ailleurs du diagnostic de dépôt par ruissellement (Goldberg *et al.*, 2001).

La circulation de l'eau peut également induire la migration verticale des charbons de bois. Si Berger estime que seules les particules inférieures à 60µm sont concernées (1996), il est clair que dans un remplissage de grotte composé de blocs, clastes, ou graviers, les ruissellements superficiels entraîneront le comblement des espaces interstitiels et pourront drainer des particules de charbons de taille importante qui s'infiltreront en profondeur par percolation. La migration verticale des charbons de bois dépend de la force de l'écoulement, mais aussi très étroitement de la nature du sol, de sa porosité et de l'importance et la taille des espaces interstitiels. Par ailleurs, les mouvements secondaires du sol, cryoturbation, ouverture de fentes (par dessiccation ou contraction thermique) favoriseront la migration verticale des charbons de bois.

II.3. Structure du charbon de bois et altérations diagénétiques et biologiques

Rosalind Franklin dans les années 50 est la première à avoir tenté de caractériser la structure des résidus carbonés. Elle distingua le carbone graphitisé du carbone non-graphitisé (Franklin, 1951). Les structures carbonées ordonnées telles le graphite sont des carbones graphitiques. Les carbones non-graphitiques sont ordonnés dans deux dimensions, mais n'ont aucun ordre cristallin dans la troisième direction.

L'évolution thermique des matériaux carbonés conduit à l'élimination des composés organiques volatils contenus dans la structure du matériau, à l'aromatisation du matériau et à l'apparition d'ensembles aromatiques constitués de feuillets aromatiques empilés (Antal and Grønli, 2003). Lorsque le traitement thermique se poursuit, ces ensembles s'ordonnent progressivement. Certains carbones non-graphitiques sont ainsi « graphitables » par traitement thermique.

Tous les travaux sur le charbon de bois mettent en évidence une structure présentant deux phases : une phase cristalline composée de microcristallites graphitiques et une phase amorphe, non organisée (Cohen Ofri *et al.*, 2006 ; Braadbaart et Poole, 2009 ; Ascough *et al.*, 2010 ; 2011b). Mais logiquement, selon la température de production du charbon, la structure du matériau varie. Schématiquement, plus la température augmente, plus le domaine graphitique est étendu et la stabilité chimique importante (les charbons produits à haute température sont notamment très résistants à l'oxydation ; Ascough *et al.*, 2011b). Quelques différences sont par ailleurs notées dans l'étendue du domaine graphitique selon l'espèce carbonisée. Ces variations sont sans doute liées aux proportions inégales des constituants initialement présents dans le bois, mais l'espèce est beaucoup moins incidente sur la structure du matériau carboné que la température de production (Ascough *et al.*, 2010). En contexte archéologique, les charbons de bois, issus de différentes espèces et produits dans des structures de combustion ouvertes dans lesquelles la température est une donnée variable, sont susceptibles de présenter des états structuraux différents. Cela permet d'envisager des phénomènes de conservation différentielle. Les travaux précités montrent par ailleurs qu'une altération diagénétique des charbons de bois est possible. Celle-ci serait accentuée en contexte alcalin et liée à un processus d'auto-humification, conduisant à la réduction de la phase graphitique (Cohen-Ofri *et al.*, 2006). L'incidence du pH sur la structure du charbon de bois est également mise en évidence par les travaux de Rebollo *et al.* destinés à évaluer les effets des prétraitements dans le cadre de datations radiocarbone. Les changements majeurs notés sont la formation de ponts salins à pH élevé et la perturbation des cristallites graphitiques à pH faible. Les « ponts salins » reliant les molécules apparaissent comme l'un des facteurs de la stabilité du matériau. Ainsi, les traitements acides produisent un matériau relativement homogène, tandis que les traitements alcalins génèrent un produit hétérogène. Ces modifications structurelles sont envisagées pour expliquer la préservation différentielle des charbons de bois dans la grotte Kébara. Dans la zone sud, les charbons sont mieux conservés en raison de la chute du pH du sédiment, alors que dans la zone nord dans laquelle cette diminution du pH n'a pas eu lieu, ils auraient été rapidement oxydés et désintégrés (Cohen-Ofri *et al.*, 2006 ; Rebollo *et al.*, 2008).

De la même manière, il semble que des altérations biologiques de la matière peuvent se produire, notamment en raison de l'activité fongique (Wengel *et al.*, 2006) et microbienne (Zimmerman, 2010) à l'instar du charbon fossile pour lequel ce processus est étudié de longue date (Hofrichter *et al.*, 1997 ; Mukasa-Mugerwa *et al.*, 2011).

La structure atomique du charbon de bois semble donc moins stable qu'on ne l'a longtemps pensé. Pour autant, les modifications de la microstructure du matériau n'induisent pas nécessairement des modifications importantes de la macrostructure. On peut cependant envisager que les altérations diagénétiques, lorsqu'elles ont lieu, puissent accentuer l'incidence des processus mécaniques, lesquels apparaissent comme le facteur majeur d'altération, voire de destruction du matériel anthracologique. De même, la macrostructure, à savoir, la structure anatomique, est sans doute un facteur de variabilité plus important du point de vue de la potentielle conservation différentielle des essences. On ne peut néanmoins exclure des interactions « structure atomique/structure anatomique » et des analyses croisant les points de vue devront sans doute être menées à l'avenir.

II.4. Les processus induisant des phénomènes de compression

Avec une intensité variable, la plupart des processus post-dépositionnels peuvent avoir leur place dans cette catégorie : le piétinement par les hommes et les animaux, la météorisation, le ruissellement, les mouvements sédimentaires de retrait-gonflement, tous les phénomènes périglaciaires. Outre des phénomènes de déplacements, ils participent, par les pressions qu'ils engendrent, de la fragmentation du matériel anthracologique. Cela induit deux questions majeures :

- la fragmentation est-elle homogène entre les taxons ou génère-t-elle des sous/surreprésentations de certaines essences ?
- ces phénomènes sont-ils à même de générer une hyper-fragmentation de nature à faire « disparaître » le matériel ?

Or, très peu de données documentent à ce jour ces processus et nous sommes bien incapables de répondre à ces deux questions majeures.

Deux études peuvent néanmoins être rapportées : les expérimentations réalisées par Théry-Parisot visant à documenter les effets des cycles gel-dégel sur les charbons de bois (1998,

2001) ; les tests de compression mécanique mis en œuvre par C. Lancelotti (2010) sur des espèces du nord de l'Inde. Quelques informations peuvent également être tirées d'études visant à documenter le comportement d'autres matériaux ; celles-ci sont plus nombreuses, notamment concernant le piétinement.

- *Gel-dégel*

Le charbon de bois, matériau poreux et doué d'un fort pouvoir d'absorption, capte l'eau du milieu, laquelle voit son volume augmenter d'environ 9% lors du passage de la phase liquide à la phase solide. Le changement de volume de l'eau entraîne des pressions à l'intérieur des fragments de charbon qui peuvent conduire à leur fragmentation. Parallèlement, le sédiment englobant fait l'objet de gonflements cryogéniques et de rétractations thermiques, phénomènes proches des gonflements par hydratation des argiles ou des retraits par dessiccation. Ces mouvements du sol créent des pressions externes qui s'exercent sur le matériel en même temps qu'ils génèrent des déplacements verticaux et horizontaux (cryoexpulsion, illuviation, cryoreptation, solifluxion).

Dans bien des séquences pléistocènes, les traces de tels phénomènes sont visibles. Dans les sites dans lesquels l'action du gel est remarquable, les charbons de bois sont parfois absents. Les travaux expérimentaux de Théry-Parisot (2001) documentent l'effet des processus mécaniques sur les charbons de bois dans ce type de contextes :

- ✓ la première expérimentation a concerné l'effet de cycles de gel sur des charbons de bois en faisant varier (i) l'état ante-combustion du bois (des lots issus de bois sains –*Pinus sylvestris* et *Alnus* sp.– et des lots issus de bois de ramassage, altéré par les micro-organismes –*Salix* sp.–) ; (ii) la température de carbonisation des échantillons (350° et 750°C) ; (iii) le conditionnement des lots (les charbons sont placés en congélateur immergés et non immergés) ; et (iv) l'intensité du gel (-4° et -18°C). Le protocole met principalement en œuvre les pressions internes liées au gel des fragments eux-mêmes, et, de manière secondaire dans le cas des charbons immergés, les pressions externes liées au changement de phase de l'eau.

Après 842 cycles gel-dégel, les résultats indiquent que :

- les conditions d'humidité et l'état physiologique du bois avant sa carbonisation sont les deux variables qui agissent le plus sur la fragmentation des charbons de bois. La température de carbonisation et l'intensité du gel influencent la fragmentation seulement de manière secondaire.
- La morphologie des géli-fracts est différente en fonction de l'état physiologique du bois avant sa carbonisation. Les charbons issus de bois altérés, plus poreux, présentent une meilleure absorption, l'eau y pénètre plus profondément et ils se fragmentent davantage et plus vite. Ils passent majoritairement dans la classe des micro-charbons, alors que ceux issus de bois sain produisent une poussière de charbon, mais le bloc initial reste cohérent.
- Dans ces expériences, les échantillons sains commencent à se fragmenter après 500 cycles, tandis que la fragmentation des échantillons altérés commence dès 150 cycles.

✓ Afin de tester de manière isolée l'incidence des pressions externes sur les charbons de bois, une seconde série d'expérimentation est réalisée. Il s'agit d'essais de compression radiale sous presse mécanique. Trois échantillons de Pin sylvestre (l'un sain, le second altéré ramassé en milieu naturel et le dernier contaminé en laboratoire) sont carbonisés selon deux températures (350° et 750°C). Les tests de compression visent à étudier l'évolution de la résistance mécanique des charbons de bois, en fonction de la température de carbonisation et de l'état physiologique du bois ante-combustion. L'hypothèse sous-jacente concerne la conservation différentielle des charbons issus de bois altérés et donc de l'influence des modalités de collecte du bois de feu (ramassage de bois mort au sol par exemple) sur la formation et la préservation des assemblages anthracologiques.

Les tests de compression ont montré que :

- les bois sains carbonisés offrent une résistance d'environ un tiers de celle de la même espèce non carbonisée.
- les bois altérés carbonisés offrent très peu de résistance mécanique et dans le cas des échantillons contaminés en laboratoire, la souche inoculée semble avoir une influence sur les résultats, mais dans l'ensemble, la résistance est très faible.

- dans cette expérience, la T° de combustion ne paraît pas avoir une forte incidence sur la résistance des charbons, contrairement à l'état du bois avant la carbonisation dont l'influence est majeure.

Ces résultats ont donc permis de montrer que les charbons issus de bois altérés présentent une résistance mécanique largement inférieure aux charbons issus de bois sains ; ils sont donc plus à même d'être affectés par les processus post-dépositionnels.

L'identification sur les charbons de « stigmates » de l'usage de bois altéré représente dès lors un enjeu important permettant d'obtenir des informations sur les modalités de la collecte du bois de feu, mais aussi de questionner l'intégrité des assemblages anthracologiques et leur représentativité paléoenvironnementale.

- *Caractérisation des propriétés mécaniques des charbons de bois*

Plus récemment, une série de tests de compression (en face radiale et transversale) a été mise en œuvre sur des essences du nord de l'Inde par Lancelotti *et al.* (2010). Cette expérience avait pour but de documenter les différences de résistance mécanique des charbons de bois produits à différentes températures (200°, 300°, 400°C) ainsi que la forme des fragments produits par la compression, en lien avec leur potentiel de lisibilité taxonomique et de re-fragmentation.

Les résultats montrent que la résistance des essences et la dimension des fragments produits est corrélée à la température. La résistance mécanique est plus importante en section transversale ; elle n'est pas corrélée à la densité du bois. Les bois denses sont plus friables que les bois de faible densité. La majorité des fragments produits sont fins et longs et donc plus facilement re-fragmentables. Des variations entre taxons sont par ailleurs visibles.

Pour les régions tempérées, l'indigence des données disponibles pour documenter la résistance mécanique des charbons de bois nous a incitée à réaliser une série de tests de compression, dont les résultats sont présentés au chapitre II.

- *Apport des données concernant les autres matériaux : le piétinement*

Si les travaux concernant spécifiquement les charbons de bois sont rares, les résultats issus d'autres disciplines peuvent peut-être nous permettre d'extrapoler quelques informations.

Le piétinement a largement été testé par les archéologues, lithiciens et archéozoologues.

De la plupart des expérimentations ressort que le piétinement génère le déplacement vertical (vers le bas comme vers le haut) et horizontal des vestiges, ainsi que sa fragmentation. Lorsque deux couches de vestiges sont initialement installées, il n'y a plus qu'une seule couche de vestiges visible à l'issue de l'expérimentation. La fragmentation est plus importante lorsque le matériel n'est pas recouvert de sédiment (Courtin et Villa, 1982 ; Lenoble et Bordes, 2001). Les os, et en particulier les os brûlés et plus encore calcinés, sont très fragmentés par le piétinement humain ou animal (Stiner, 1995) ; dans certains cas, 90% des os brûlés ont disparu à l'issue de l'expérimentation (Thiebaut *et al.*, 2010b). On peut aisément supposer que les charbons de bois sont également sensibles au piétinement et n'échappent à aucun des processus (déplacements, fragmentation) mis en évidence pour les autres types de matériaux. D'après G. Haynes (1991) on observerait dans le cas des os une perte différentielle de certains éléments anatomiques. S'agissant des charbons de bois, il est nécessaire de vérifier si les taxons réagissent différemment afin d'évaluer la possibilité d'une conservation différentielle.

Conclusion du chapitre I

L'étude des processus de formation du dépôt sédimentaire et les analyses taphonomiques permettent d'envisager l'importance des altérations et remaniements subis par les niveaux archéologiques et constituent donc un préalable à toute approche « anthropologique » en archéologie.

De gros efforts de caractérisation des « stigmates » des divers processus post-dépositionnels sur les vestiges archéologiques ont été réalisés au sein de chaque discipline, permettant aux divers spécialistes d'évaluer l'intégrité des ensembles étudiés en même temps que certains éléments prenaient un caractère diagnostique d'un mode de dépôt ou d'un agent d'altération donné. En anthracologie, cette donnée est très peu disponible. Un bilan des informations disponibles dans la littérature montre bien que les charbons de bois, comme les autres vestiges archéologiques, sont sujets à divers types d'altérations et remaniements (notamment le déplacement horizontal et vertical des particules, l'altération diagénétique de la matière et la fragmentation du matériau sous l'effet des phénomènes de pression), toutefois une « gradation » de l'impact des différents processus post-dépositionnel n'est pas possible en l'état des connaissances. Il est donc difficile pour l'anthracologue, même lorsqu'une étude précise de la mise en place des dépôts est menée, d'évaluer le niveau d'intégrité de l'assemblage étudié. Nous l'avons vu, l'abondance ou l'indigence des résidus de combustion peut être liée à des pratiques anthropiques particulières, à la mise en œuvre du processus de combustion comme aux conditions plus ou moins favorables de conservation du dépôt *a posteriori*.

Questionner les raisons de l'abondance ou de l'indigence des charbons de bois dans un site archéologique, peut participer, aux côtés des interrogations formulées et des réponses apportées au sein de chaque discipline, de la compréhension générale du site, tant du point de vue de son histoire taphonomique que de son occupation. Mais cela induit cependant que les effets particuliers des différents processus post-dépositionnels sur les charbons de bois soient au préalable connus. L'acquisition de cette donnée peut permettre en retour, et à la condition du croisement des résultats archéologiques et géoarchéologiques, d'aborder la question des comportements humains ayant trait notamment au choix du combustible, à la mobilité des groupes, la durée d'occupation des sites et leur fonction, etc.

Elle est également un élément précieux pour l'évaluation du degré de fiabilité de l'information paléoenvironnementale produite par l'anthraco-analyse.

CHAPITRE II

OUTILS ET PRINCIPES MÉTHOLOGIQUES RETENUS POUR L'ÉTUDE DE L'IMPACT DES PROCESSUS POST-DÉPOSITIONNELS SUR LES ASSEMBLAGES ANTHRACOLOGIQUES

Introduction

Ce travail a été mené dans le but de combler – au moins partiellement – les lacunes relatives à notre connaissance du processus de fragmentation des charbons de bois induit par les processus post-dépositionnels. Il s'inscrit avant tout dans une perspective méthodologique, et se situe dans la continuité des travaux ayant pour objectif de mieux comprendre les mécanismes de formation de l'assemblage anthracologique – en particulier sur le plan quantitatif – de manière à repousser les limites interprétatives de la discipline (Bazile-Robert, 1982 ; Chabal, 1982, 1988, 1990, 1991, 1992 ; Badal, 1992 ; Loreau, 1994 ; Théry-Parisot, 1998, 2001 ; Théry-Parisot *et al.*, 2010 a et b; Caruso-Fermé et Théry-Parisot, 2011; Henry, 2011). Les données produites dans le présent manuscrit visent à apprécier la représentativité de l'assemblage anthracologique au sens large, et notamment à évaluer si des fonctions de transfert entre végétation initiale et assemblage anthracologique sont envisageables et peuvent à terme être précisées. Seule l'expérimentation permet d'aborder des questions de cette nature dans la mesure où l'observation finale peut être rapportée à une situation de départ connue ; c'est donc cette voie que nous avons empruntée tout au long de notre travail. L'analyse de la donnée expérimentale produite a nécessité le recours à un certain nombre d'outils, parmi lesquels les statistiques tiennent une place de choix. La démarche expérimentale et les principaux outils de traitement utilisés sont succinctement présentés ci-après.

I. L'APPROCHE EXPÉRIMENTALE

I.1. Le choix de l'expérimentation

La démarche expérimentale vise à évaluer la pertinence - validation, invalidation - d'une hypothèse en la soumettant à « l'épreuve des faits ». La sensibilité des charbons de bois à l'action des processus post-dépositionnels est une hypothèse formulée régulièrement et de longue date ; elle est fréquemment invoquée pour expliquer l'absence de charbons dans les gisements. De même, alors que l'on a longtemps considéré - *a*

priori - que le charbon est un matériau « biologiquement et chimiquement stable » - ce que semblent contredire les données récentes (cf. chapitre I. § II.3) -, on admet volontiers au contraire que les processus mécaniques constituent un agent majeur d'altération du matériau. Or, la réelle vulnérabilité des charbons de bois soumis aux processus post-dépositionnels -mécaniques en particulier-, et la variabilité de la réaction du matériau aux divers agents n'ont été que très peu étudiées.

Notre démarche consiste donc à évaluer « concrètement » le degré de sensibilité des charbons de bois à ce type de processus, par l'observation de faits réels que seule l'expérimentation permet de produire. Le contrôle des paramètres permet, lors de la mise en œuvre expérimentale, de séparer les processus que l'on cherche à observer et ainsi, de mesurer leur impact individuel. L'observation et la compréhension des phénomènes pris isolément permettent à terme d'acquérir une vision globale des mécanismes en jeu.

En outre, parce que l'expérimentation – en conditions de laboratoire – peut être menée sans « temps morts », c'est-à-dire sans les phases d'inactivité naturelle des processus que l'on cherche à observer, elle permet partiellement d'en accélérer les effets et donc l'acquisition des résultats (Coutard, 2002). Chaque archéologue se confronte à la question du temps, de ses effets et des lacunes qu'ils induisent sur l'information qui nous parvient. L'expérimentation, si elle ne peut entièrement combler ces lacunes, nous autorise en revanche à aborder le « temps long » à partir de la courte durée.

Trois types d'expérimentations ont été mises en œuvre dans le cadre de ce travail : i) des expériences en contexte « naturel » visant à évaluer *in situ*, en conditions « réelles », et selon une intervention minimale de notre part, l'effet d'un phénomène donné (météorisation, impact des conditions périglaciaires par exemple); ii) des expériences mettant en œuvre des simulations simples de phénomènes tels que les cycles gel-dégel ou imbibition-dessiccation (les paramètres agissant sont alors volontairement déterminés et contrôlés, permettant l'observation de leurs effets sur le matériel expérimental); iii) un dernier type d'expérimentation, qui s'inscrit dans une démarche faisant appel aux sciences des matériaux et en particulier à la mécanique des milieux continus, a permis de préciser les propriétés intrinsèques du charbon de bois de manière à mieux appréhender ses réactions dans l'ensemble des dispositifs expérimentaux.

Le détail de chaque protocole expérimental est présenté en amont des résultats, cependant, afin d'alléger par la suite la lecture de ce texte, nous présentons ici les étapes de la procédure expérimentale communes à la majorité des protocoles mis en œuvre, en particulier celle de la fabrication des échantillons.

I.2. Provenance des lots de bois

Deux lots de bois ont successivement été utilisés au cours de nos expérimentations. Dans un premier temps, avant que nous n'ayons achevé la production de nos propres échantillons, nous avons utilisé le matériel issu de combustions réalisées au Cepam dans le cadre de l'ACI « Économie des combustibles au Paléolithique, de l'Expérimentation à la Modélisation » (Programme ACI, Théry-Parisot, dir.). Ces charbons de bois ont constitué les échantillons des deux premières expériences que nous avons réalisées, soit les dépôts effectués à Gavarnie – chapitre IV § I – et l'essai de piétinement mis en œuvre sur le site de Castanet (Sergeac, Dordogne, France) – chapitre V § IV.2–

Par la suite, chacune des autres expériences a été menée avec de nos propres échantillons, issus d'une série de combustions standardisées mises en œuvre à partir d'un nouveau lot de bois. Deux à trois combustions par taxon ont permis d'obtenir le matériel suffisant pour mener la totalité de nos expérimentations.

Au total, 14 taxons ont été testés dans le cadre de ce travail : *Acer pseudoplatanus*, *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Juniperus oxycedrus*, *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, *Pinus sylvestris*, *Populus alba*, *Populus tremula*, *Quercus pedunculata* et *Quercus pubescens*.

Afin de prendre en compte l'état physiologique du bois, deux de ces essences sont intégrées dans une partie au moins des expériences dans un état de dégradation avancé : le bouleau (*Betula pubescens*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*).

Les bois d'*Acer* (érable), *Carpinus* (charme), *Fagus* (hêtre), *Fraxinus* (frêne), *Quercus pedunculata* (chêne pédonculé) proviennent du plateau de Langres et du Châtillonnais (Haute Marne). Le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) est exploité à Fayence dans le Haut Var. Le noisetier (*Corylus*) vient de la forêt domaniale de Nans (St. Vallier de Thiey, Alpes maritimes),

le bouleau (*Betula*) de la forêt domaniale de la Tinée (Ilonse, Alpes-maritimes). Le tremble (*Populus tremula*) et le chêne pubescent (*Quercus pubescens*) proviennent de la région niçoise et le peuplier blanc (*Populus alba*) vient de la forêt communale de St Auban (Alpes-maritimes). Les bois de *Pinus pinaster* (pin maritime) et de *Pinus halepensis* (pin d'Alep) ont été coupés autour des anciens locaux du laboratoire du Cepam, à Sophia-Antipolis et le Genévrier (*Juniperus oxycedrus*) dans la région d'Apt dans le Vaucluse.

Enfin, le pin sylvestre altéré a été collecté sur le plateau de Caussols (Alpes-Maritimes) tandis que le bouleau altéré provient de Bourgogne.

Des lots de bûches de 30 à 50cm de long et de 10 à 15cm de diamètre ont été achetés à des entreprises privées de vente de bois de chauffage ou à l'ONF. Dans d'autres cas, le bois nous a été confié par des élagueurs ou a été collecté par nos soins. Toutes les essences ont été séchées à l'air pendant au moins un an et demi avant leur mise au feu.

I.3. Combustions et préparation des échantillons expérimentaux (planche 1)

À l'exception des échantillons préparés pour les tests de compression axiale (dont la fabrication en four à moufle est détaillée au chapitre III), tous les charbons utilisés dans nos expériences ont été produits au cours de combustions en foyer ouvert, menées dans les locaux du Cepam. Trois bûches non refendues sont installées dans le foyer entre lesquelles sont disposés douze capteurs enregistrant les variations locales de température et la durée de la combustion. Il n'y a pas d'apport de petit bois pour l'allumage qui est réalisé à l'aide d'un chalumeau. La durée des flammes et de l'incandescence est notée.

Lorsque les cendres sont refroidies, les résidus de la combustion sont triés sur une colonne de tamis (< 0.5mm, 0.5-1mm, 1-2mm, 2-4mm, > 4mm). Le contenu de chaque tamis est pesé. Les charbons expérimentaux sont prélevés dans le refus de tamis supérieur à 4mm. Ils sont mesurés et pesés individuellement (précision au milligramme) avant leur utilisation (à l'exception des deux premières expériences que nous avons mises en œuvre [Gavarnie – chapitre IV § I – et piétinement n°2 – chapitre V § IV.2 –] pour lesquelles des pesées globales, par taxon et non par fragment, avaient été réalisées).

PROTOCOLE EXPERIMENTAL TYPE

Combustions en foyer ouvert pour chaque taxon



3 bûches non refendues par feu, 12 capteurs thermiques, allumage au chalumeau, combustion menée à son terme

Constitution de deux lots de fragments par taxon pour chaque expérience

Tamisage des résidus de combustion



Corylus lot 1



Corylus lot 2



PIETINEMENT

GEL-DEGEL

RETRAIT-GONFLEMENT, etc...

	Lot 1	Lot 2		Lot 1	Lot 2		Lot 1	Lot 2
<i>Acer</i>	15 frgts	15 frgts	<i>Acer</i>	3 frgts	3 frgts	<i>Acer</i>	5 frgts	5 frgts
<i>Betula</i>	15 frgts	15 frgts	<i>Betula</i>	3 frgts	3 frgts	<i>Betula</i>	5 frgts	5 frgts
<i>Carpinus</i>	15 frgts	15 frgts	<i>Carpinus</i>	3 frgts	3 frgts	<i>Carpinus</i>	5 frgts	5 frgts
<i>Corylus</i>	15 frgts	15 frgts	<i>Corylus</i>	3 frgts	3 frgts	<i>Corylus</i>	5 frgts	5 frgts
<i>Fagus</i>	15 frgts	15 frgts	<i>Fagus</i>	3 frgts	3 frgts	<i>Fagus</i>	5 frgts	5 frgts
<i>etc...</i>			<i>etc...</i>			<i>etc...</i>		

Planche 1 : Éléments communs des divers protocoles expérimentaux

Des fragments de charbon de quelques centimètres cube sont prélevés dans les résidus de combustion de manière à constituer au moins deux lots de fragments d'un même taxon par expérience (de 1 à 15 fragments par lot selon les protocoles). En les soumettant aux mêmes

conditions expérimentales, il est ainsi possible d'observer et d'évaluer la reproductibilité du comportement taxonomique d'un lot à l'autre.

II. L'ANALYSE D'IMAGE (logiciel libre image j - <http://rsb.info.nih.gov/ij/> -)

L'un des objectifs de nos expérimentations consiste à étudier le phénomène de fragmentation des taxons lorsqu'ils sont soumis à diverses sollicitations. Celui-ci est appréhendé en fonction de l'essence, mais en prenant également en compte la taille des fragments produits à l'issue de l'expérimentation. Les fragments sont tamisés par lot d'échantillons (deux lots par espèce) selon trois à quatre classes de taille :]0.5-1mm],]1-2mm],]2-4mm], >4mm. Le nombre de fragments dans chaque classe de taille est ensuite comptabilisé. Un comptage grain à grain induit une manipulation parfois peu aisée, éventuellement destructrice, et surtout longue et fastidieuse.

Par ailleurs, la réaction des taxons aux sollicitations est envisagée en fonction de leurs propriétés physiques et anatomiques. Il importait en particulier d'obtenir une mesure de la porosité des échantillons de manière à évaluer l'incidence de ce critère – dont on suppose *a priori* qu'il peut être pertinent – sur le comportement des taxons.

Deux macros ont donc été développées pour le logiciel libre ImageJ, l'une permettant le comptage des fragments et micro-fragments de charbon produits à l'issue de chaque expérimentation, l'autre permet la mesure de la porosité des macro-échantillons sur photos MEB. Ces macros ont été écrites par A. Ducom au cours d'un stage réalisé au Cepam dans le cadre de sa formation à l'École Polytechnique (Ducom, 2010).

II.1. Comptage des fragments

Le programme se fonde sur la détection des minima de niveaux de gris sur une image. Après tamisage, les fragments de charbons de chaque classe de taille sont disposés sur une feuille blanche pour chaque taxon et minutieusement séparés les uns des autres.

Une photo numérique est prise, convertie en noir et blanc (codage 8 bits). Comme le logiciel détecte le moindre pixel sombre sur le fond blanc (y compris les poussières et éventuelles traces laissées par les charbons sur la feuille), l'application de la fonction *smooth* une

vingtaine de fois permet en quelque sorte de « fondre » ces zones de manière à ce qu'elles ne soient pas comptabilisées. Le programme est muni d'une ligne d'écriture marquant d'un repère les particules prises en compte par le logiciel lors de son décompte (un petit point blanc apparaît). Cela permet donc de vérifier la validité du comptage effectué (planche 2). La comparaison du nombre effectif de fragments avec celui comptabilisé par le logiciel à l'issue de cette procédure est extrêmement satisfaisante.

La procédure, relativement longue et toujours quelque peu fastidieuse, l'est cependant moins qu'un comptage manuel.



Planche 2 : Comptage des fragments par analyse d'image

II.2. Mesure de la porosité

Le programme dédié à la mesure de porosité est fondé sur la détection des différences de niveaux de gris de l'image traitée. Le logiciel parcourt l'image dans les quatre directions (haut-bas, bas-haut, droite-gauche, gauche-droite), en repérant les différences de niveaux de gris supérieures à un certain pas. Les pixels interprétés comme des vides (zones les plus sombres) sont dénombrés. La moyenne du nombre de pixels – supérieurs au niveau de gris fixé – repéré dans les quatre directions, divisée par le nombre de pixels total de la zone d'image sélectionnée permet d'obtenir la part de « vide » que contient la tranche de charbon mesurée. Une ligne du programme commande au logiciel de colorer en gris clair les pixels interprétés comme des vides pris en compte dans le calcul. Le résultat montre que les macrospores (intérieur des vaisseaux et des fibres, espaces intercellulaires, etc.) sont repérés assez finement (planche 3).

Les tests initiaux réalisés à partir de photos prises au microscope optique ne s'étant pas révélées d'une précision suffisante, l'obtention de photos au microscope électronique à

balayage s'est avérée nécessaire. Des photos MEB de nos échantillons expérimentaux ont donc été prises au laboratoire du CEMEF (Centre de mise en forme des matériaux, mines-Paristech, Sophia-Antipolis) afin de pouvoir effectuer les mesures de porosité propres à notre matériel. Deux types de mesures sont utilisés dans notre travail : la mesure de porosité globale de l'échantillon (dont les variations sont finalement assez faibles d'une espèce à l'autre) et la différence de porosité entre le bois initial et le bois final pour chaque taxon (cet indice étant beaucoup plus variable entre les taxons) (résultats en annexe I., fig. 2 et 3).

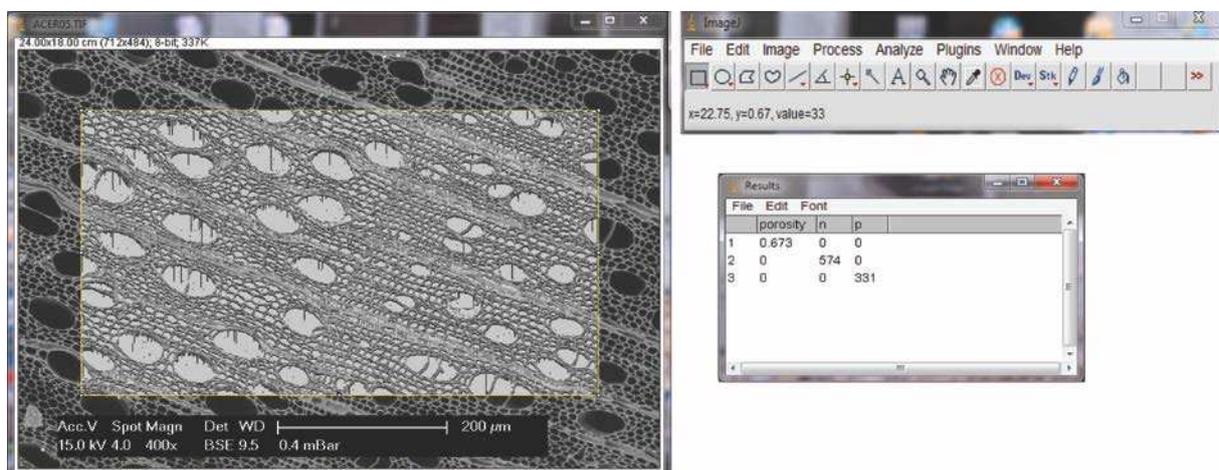


Planche 3 : Mesure de la porosité par analyse d'image

III. L'ANALYSE STATISTIQUE (réalisée à l'aide du logiciel libre r : www.r-project.org/ et de xlstat : addinsoft)

À l'issue des expérimentations, nous disposons d'une série de mesures quantitatives, telles que le nombre de fragments produits dans chaque classe de taille ([0.5-1mm],]1-2mm],]2-4mm], >4mm), la porosité, la masse volumique de l'échantillon, etc., et d'un certain nombre de données qualitatives, telles que le taxon, ses caractéristiques anatomiques, le type de sollicitation auquel l'échantillon a été soumis, etc.

Nous avons cherché à apprécier l'intensité de l'effet du processus testé, en fonction des propriétés physiques et des caractéristiques anatomiques des essences. Par ailleurs, un des impératifs majeurs de notre étude est d'évaluer la variabilité de la réponse des taxons aux

différentes sollicitations et ainsi d'envisager l'importance du comportement différentiel des essences en lien avec leur capacité de conservation en contexte archéologique.

Un traitement statistique s'est donc avéré nécessaire pour mener l'analyse *in fine* de nos données, permettant une mesure objective du comportement des taxons en fonction des différentes variables (quantitatives et qualitatives) considérées.

Le choix des tests utilisables répond à des normes strictes qui dépendent de l'objectif fixé et de la nature de la donnée disponible. Nous présentons ici, dans les grandes lignes, le fonctionnement, le but et les conditions qui justifient l'utilisation des tests mis en œuvre au cours de notre travail.

III.1. Tests paramétriques

Les tests paramétriques utilisent les « paramètres » de la/les séries de données traitées, à savoir la moyenne, l'écart-type, la variance, etc., et reposent donc sur les valeurs réelles de la série de données.

Ces paramètres ne caractérisent la/les séries de données que sous certaines conditions relatives à leur distribution : la moyenne, la variance et l'écart-type ne sont de bons indices de la tendance centrale et de la dispersion de l'échantillon que si la distribution des valeurs est « normale ». De même, deux échantillons ne peuvent être comparés que si leur variance est statistiquement homogène.

La loi normale dépend de deux paramètres, la moyenne et l'écart-type. Schématiquement, dans une distribution normale, la moyenne « m » correspond à la valeur centrale de la série ; les autres valeurs sont dispersées autour de cette valeur centrale de sorte que 68% d'entre elles se situent dans l'intervalle ($m \pm 1$ écart-type), et 95% dans l'intervalle ($m \pm 2$ écarts-types), formant ainsi une courbe en cloche ou courbe de Gauss.

Dans le cas du traitement de « petits échantillons » ($n < 30$), il est difficile de vérifier que les conditions de normalité et d'homogénéité des variances sont bien remplies et il arrive fréquemment qu'elles ne le soient pas, interdisant alors l'utilisation de tests « paramétriques ». Dans de rares cas seulement, la taille de nos effectifs et la distribution de nos données ont permis l'utilisation de certains tests paramétriques.

- *Test de régression linéaire*

Nous utilisons la régression linéaire uniquement lorsque notre effectif est supérieur à 30 individus (n valeurs d'une série de données : par ex. le nombre de fragments produits à l'issue de la compression de chacun des 302 cubes de charbon de bois, où $n=302$) et lorsque la distribution des valeurs décrivant ces individus suit la loi normale.

Nous cherchons à déterminer s'il existe une relation linéaire entre une variable quantitative X et une autre variable quantitative Y, de sorte que lorsque X augmente, Y augmente également. L'objectif ici n'est pas prédictif, mais explicatif : par ex., la masse volumique du charbon – qui varie en fonction du taxon – a-t-elle une influence sur l'intensité de la fragmentation (nombre de fragments produits) ? Le modèle de régression permet de calculer le coefficient de détermination (R^2) de la relation entre nos deux variables ; plus celui-ci est proche de 1, plus la relation est importante (la dispersion des valeurs autour de la droite qui lie nos deux variables est faible), inversement, plus la relation est faible, plus le R^2 est proche de 0 (l'écart des valeurs par rapport à la droite de régression est important).

- *Analyse de variance (Anova / Ancova)*

L'analyse de variance utilise le même cadre conceptuel que la régression linéaire à cette différence que les variables explicatives, au lieu d'être quantitatives, sont ici qualitatives. Dans le cadre de l'ANOVA, les variables explicatives sont souvent appelées facteurs. L'analyse de la variance permet d'étudier le comportement d'une variable continue (quantitative) en fonction d'une ou de plusieurs variables explicatives nominales (qualitatives). La variance est une mesure qui sert à caractériser la dispersion d'un échantillon et l'analyse de variance peut être considérée comme un test paramétrique dans la mesure où elle se fonde sur la distribution des valeurs réelles des variables. L'analyse de variance consiste à expliquer la variance totale (sur l'ensemble des échantillons) en fonction de la variance due aux facteurs (la variance expliquée par le modèle), celle due à l'interaction entre les facteurs, et la variance résiduelle aléatoire (la variance non expliquée par le modèle). Elle repose sur le test de Fisher et elle est donc contrainte en théorie par la normalité de la distribution des variables et l'homoscédasticité (homogénéité des variances

lorsque plusieurs variables quantitatives sont intégrées à l'analyse). En pratique, l'Anova est réputée peu sensible à la non-normalité des populations considérées. De même, l'hypothèse d'homoscédasticité est d'importance relativement secondaire lorsque les effectifs des échantillons sont tous égaux. Dans ces conditions, l'analyse de variance est une méthode robuste, tant en ce qui concerne la normalité, qu'au point de vue de l'égalité des variances.

Nous avons utilisé l'ANOVA pour traiter certaines de nos données, en intégrant une seule variable quantitative à la fois, décrite par plusieurs variables qualitatives et sur des effectif toujours supérieurs à 5 (effectif minimal de l'ANOVA) et tous égaux. C'est par exemple le cas au chapitre IV dans le traitement des résultats issus des dépôts de charbon de bois réalisés en contexte naturel à Gavarnie : nous cherchons alors à déterminer s'il existe un lien entre les variables quantitatives « fragmentation », « dispersion latérale du matériel », « disparition du matériel » et les facteurs « type de dépôt », « temps de dépôt », « taxon », lesquels sont définis par plusieurs modalités (dépôt enterré/dépôt de surface ; années 2008/2009/2010 ; taxons *Betula*, *Corylus*, *Pinus*, etc.). Le test permet alors de mettre en évidence les liens, ou au contraire l'absence de lien, entre les variables et les facteurs, mais aussi de hiérarchiser les effets des différents facteurs et de leurs modalités.

- *Égalité des variances*

Dans chaque expérience, nous avons utilisé deux lots identiques (en nombre et en taille approximative des fragments initiaux) de charbons de bois pour chaque taxon, de manière à vérifier la reproductibilité du comportement des taxons dans les mêmes conditions expérimentales. Dans le cadre de l'étude de la fragmentation, il importait à l'issue des expérimentations d'obtenir une mesure de la ressemblance du comportement des lots entre eux en termes de nombre de fragments produits. Si le facteur taxon a une influence sur la fragmentation des charbons de bois, alors le comportement de chaque taxon dans les deux lots doit être comparable (la mesure est reproductible). Inversement, si la fragmentation des charbons dépend d'un autre facteur – inconnu –, alors le nombre de fragments produits par les conditions expérimentales dans l'un et l'autre lot sera plus aléatoire (la mesure n'est pas reproductible pour chaque taxon d'un lot à l'autre).

Statistiquement, nos individus sont représentés par les taxons utilisés, soit $n =$ au maximum 14 (pour les 14 taxons intégrés aux expériences). Le nombre de fragments produits dans chacun des lots décrit ces individus. À l'issue de chaque expérience, nous observons la ressemblance entre deux échantillons indépendants (les lots), constitués par n individus (14 taxons), décrits par une variable (le nombre de fragments produits). Tester l'homogénéité de la variance de nos deux séries de données peut permettre d'évaluer le niveau de proximité des deux échantillons. Toutefois, la comparaison des deux séries est ici contrainte par le nombre réduit d'individus et par la non-normalité fréquente de leur distribution. Or, la plupart des tests d'homogénéité des variances, tels le **test de Bartlett**, nécessitent des effectifs normalement distribués. **Le test de Levene** offre une alternative au test de Bartlett et constitue un bon compromis entre puissance et robustesse face aux écarts à la normalité. Le fait d'utiliser la médiane plutôt que la moyenne comme paramètre de position rend le test plus robuste dans le cas où la distribution des données est asymétrique. Parce qu'il tolère de plus grands écarts à la normalité, nous avons utilisé le test de Levene dans le cadre du traitement de nos données. Parallèlement, nous avons employé le test de Mann-Witney qui permet la comparaison non-paramétrique de deux échantillons indépendants d'effectifs inférieurs à 30.

III.2. Tests non paramétriques

Les tests non-paramétriques se fondent non plus sur les paramètres des séries de données (moyenne, écart-type, variance), mais sur le rang des valeurs. Ils ne font aucune hypothèse sur la distribution des données et ne sont donc pas contraints par l'importance des effectifs (ceux-ci doivent tout de même être au moins égal à 4) et la normalité des données. S'ils sont moins robustes que les tests paramétriques lorsque les conditions d'utilisation de ces derniers sont remplies, les tests non-paramétriques permettent en revanche d'élargir très largement le champ d'application des procédures statistiques dans les cas où les hypothèses relatives à la distribution des données ne sont pas vérifiées.

- *Comparaison de deux échantillons (Mann-Whitney) / de k échantillons (Kruskal-Walis)*

Le test de Mann-Whitney, utilisé en parallèle du test de Levene pour vérifier la reproductibilité du comportement de chaque taxon dans nos lots expérimentaux, se fonde sur les rangs des valeurs et évalue l'identité des échantillons en termes de position. Il teste l'hypothèse H_0 selon laquelle les échantillons sont identiquement positionnés. Si le nombre de fragments produits par taxon dans nos deux lots d'échantillons est proche, la position des rangs des valeurs devrait être identique. Inversement, si les taxons présentent un comportement différent d'un lot à l'autre, les rangs des valeurs dans nos deux échantillons ont toutes chances d'être inégalement positionnés.

Le test de Kruskal-Walis est une généralisation du test de Mann-Whitney, il permet de tester si k échantillons proviennent de la même population, ou de populations ayant des caractéristiques identiques, au sens d'un paramètre de position.

Il nous a permis par exemple de déterminer si les taxons présentent un comportement similaire ou, au contraire, s'il existe entre eux des différences statistiquement significatives (de propriétés mécaniques, de fragmentation, etc.).

- *Comparaisons multiples par paires : procédure de Dunn et correction de Bonferroni*

Lorsque le test de Kruskal-Walis indique une p-value inférieure au seuil alpha (fixée dans nos essais à 0.05, soit 5% de marge d'erreur) cela signifie qu'au moins un taxon diffère des autres. Il convenait donc de préciser quel taxon ou groupe de taxon s'individualisent. Nous avons alors utilisé des procédures de comparaisons multiples par paires et en particulier la **procédure de Dunn**. Celle-ci est fondée sur la comparaison des moyennes des rangs, en utilisant une distribution normale asymptotique pour la différence standardisée de la moyenne des rangs. Le test permet de visualiser les échantillons dont la somme et la moyenne des rangs s'écartent significativement de la moyenne.

La **correction de Bonferroni** a systématiquement été utilisée lors des procédures de comparaison par paires. Celle-ci permet de réduire le risque d'erreur de première espèce (conclure à tort à une différence significative). En effet, la répétition à chaque test (chaque

paire comparée) du risque d'obtenir un résultat significatif par hasard, augmente le risque global de conclure à tort. La correction de Bonferroni modifie donc le seuil alpha de chaque comparaison de manière à ce que le risque global (toutes les comparaisons de toutes les paires) demeure inférieur à 5%. Le seuil alpha utilisé pour chaque comparaison correspond à $0.05/\text{nb. total de comparaisons effectuées}$. L'une des critiques de la modification du seuil de signification de Bonferroni rencontrée fréquemment dans la littérature concerne le risque d'erreur de deuxième espèce, à savoir le risque de ne pas repérer de différence alors qu'elle existe.

- *Corrélations entre variables et coefficient de détermination*

Le test paramétrique de régression linéaire n'a été que très rarement utilisable sur nos données étant donné les effectifs réduits sur lesquels nous travaillons. Pour autant, il importait dans de nombreux cas d'évaluer le degré de relation entre des couples de variables, tels que masse volumique/fragmentation, porosité/fragmentation, résistance mécanique/fragmentation, etc. Le test de corrélation de Spearman, fondé sur les rangs des variables, a constitué une alternative à la régression. Il permet de déterminer s'il existe un lien entre deux variables (que la relation soit linéaire ou simplement monotone), le sens de cette relation (corrélation positive ou négative) et si cette relation est statistiquement significative (calcul de la p-value). Le calcul du coefficient de détermination exprime en pourcentage l'importance du lien entre les variables.

III.3. Puissance d'un test

Dans certain cas, un test de puissance a été réalisé pour évaluer le degré de fiabilité du résultat statistique mis en évidence (relation positive ou négative entre des variables, différences significatives entre deux échantillons, etc.). La puissance statistique d'un essai (d'une expérience) est son aptitude (en termes de probabilité) d'obtenir, à partir du protocole mis en place, un résultat statistiquement significatif « vrai », par opposition à un résultat « faux positif », c'est-à-dire, un résultat statistiquement significatif obtenu par hasard. L'effectif de l'échantillon prend une grande place dans le calcul de puissance et il

convient généralement de l'augmenter pour obtenir une puissance satisfaisante (on admet généralement qu'une puissance de 80% est nécessaire –notamment en médecine ou en pharmacologie pour évaluer l'effet thérapeutique réel d'un traitement– pour pouvoir accepter le résultat statistique comme étant vrai). Le calcul de la puissance est donc utile, au moment de la mise en place de l'expérience, pour déterminer l'effectif minimum qui permettra d'obtenir un résultat utilisable. Il peut également servir, *a posteriori*, pour évaluer la significativité du résultat statistique obtenu ; c'est dans cette optique que les tests de puissance ont été réalisés dans notre travail.

III.4. Analyses multifactorielles

Contrairement aux tests précédemment présentés, les analyses multifactorielles n'ont pas pour vocation de déterminer si les corrélations ou différences observées entre les groupes ou les individus sont statistiquement significatives, mais plutôt de trier, classer et décrire des données lorsque celles-ci sont trop nombreuses et/ou de natures diverses.

- *Analyse des correspondances multiples (ACM)*

L'analyse des correspondances multiples présente l'avantage par rapport aux autres techniques d'analyses multifactorielles de pouvoir croiser dans une même matrice des données quantitatives et qualitatives. Elle permet de décrire la structure d'un ensemble d'observations dont chacune est caractérisée par plusieurs variables et modalités de variables qualitatives. Les correspondances entre individus ou sous-groupes d'individus et les modalités des différentes variables sont établies.

L'ACM nécessite un ré-encodage de la donnée et se pratique à partir d'un tableau nominatif ou disjonctif complet (codage 1/0) selon les logiciels. L'analyse permet de visualiser le nuage de points des individus (profil des lignes du tableau) et le nuage de points des modalités (profil des colonnes du tableau) sur un même graphique à deux dimensions (notées selon les logiciels « dimensions » : dim1 et dim2, ou « facteurs » : F1 et F2). Comme dans l'analyse des correspondances simples, la distance du χ^2 est utilisée comme critère de distance entre les points. Les contributions et les cosinus carrés des individus et des variables permettent de

repérer les individus et modalités de variables qui ont le plus de poids dans l'analyse (les variables ne contribuant pas ou très peu à l'analyse sont retirées). La matrice des corrélations permet d'affiner l'interprétation quant aux liens existants entre les individus, entre les variables ou modalités et entre les individus et les variables ou modalités.

La mise en œuvre d'une analyse des correspondances multiples s'est révélée nécessaire, notamment pour traiter la donnée issue des 302 tests de compression axiale, afin d'observer les liens existants entre la fragmentation des essences, leurs propriétés physiques, anatomiques et mécaniques.

- *Classifications ascendantes hiérarchiques (CAH)*

Les techniques de classification permettent d'observer les regroupements qui peuvent être faits entre les individus d'un tableau ; elles ont vocation à dégager la structure d'un groupe d'individus. Des classifications ascendantes hiérarchiques ont systématiquement été mises en œuvre pour permettre une lecture plus fine de nos données et notamment visualiser les groupes de taxons dont le comportement à la fragmentation est proche. Réalisées à partir des valeurs brutes (nombre de fragments produits par taxon et par lot à l'issue de chaque expérimentation), il s'agit plus d'une représentation graphique de nos données que d'une réelle analyse. Son observation attentive, en fonction du niveau de regroupement choisi (niveau de segmentation de l'arbre de classification), nous a permis d'obtenir une vision précise de la structuration de nos données et notamment de repérer des rapprochements entre taxons que la « sévérité » de la correction de Bonferroni risquait de dissimuler.

Les CAH ont constitué un outil participant de la lecture et de l'interprétation finale des données statistiques, car en définitive, c'est bien l'opérateur qui doit décider de ce que disent ou ne disent pas les statistiques.

CHAPITRE III

CARACTÉRISATION DU « MATÉRIAU CHARBON DE BOIS » : PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET FRAGMENTATION

Introduction

Pour comprendre les mécanismes de « disparition » du matériel par hyper-fragmentation et évaluer l'importance des possibles biais interprétatifs liés aux phénomènes de fragmentation différentielle des taxons, il est nécessaire d'étudier le comportement mécanique des charbons de bois et le processus de fragmentation induit, depuis l'échelle du matériau jusqu'à celle de l'espèce.

La plupart des vestiges archéologiques (lithique, os, céramique, etc.) ont été étudiés du point de vue de leurs propriétés physico-chimiques. Une telle approche est indispensable pour mesurer le potentiel de conservation des vestiges et évaluer l'intégrité des ensembles que l'on étudie ; le charbon de bois fait de ce point de vue exception. De nombreux travaux existent sur les propriétés du bois, mais rien n'indique qu'ils soient transposables au charbon de bois. Quelques données sont disponibles sur le charbon de bois, principalement issues des travaux sur la production industrielle du charbon comme combustible ou sur sa transformation en charbon actif, mais les conditions de production du matériau, comme les préoccupations qui sous-tendent ces études, sont alors très éloignées des contextes archéologiques qui nous occupent. Une telle approche s'est donc révélée incontournable. Dans un premier temps, nous avons mis en place un protocole visant à caractériser en laboratoire, par des mesures appropriées sur du matériel actuel, les propriétés physiques de charbons de bois de plusieurs essences communes d'Europe tempérée. Le mode de fragmentation des différents taxons est ensuite étudié de manière à mettre en évidence un éventuel comportement différentiel des essences face aux processus d'altération post-dépositionnels d'origine mécanique à même de biaiser la représentativité des assemblages anthracologiques.

L'étude porte sur 302 échantillons issus de 10 taxons, carbonisés à 3 températures et soumis à des essais de compression axiale standardisés. Les résultats obtenus permettent de traiter (i) la question des propriétés mécaniques des charbons de bois, (ii) la fragmentation des différents taxons, (iii) ses modalités et (iv) les règles régissant la relation propriétés mécaniques/caractéristiques spécifiques/processus de fragmentation. Ce travail n'a pas pour ambition d'être directement applicable à l'archéologie (par exemple en établissant des indices de correction des fréquences des taxons), mais d'obtenir une donnée brute

permettant de connaître le fonctionnement intrinsèque des essences testées, d'évaluer "*a priori*" leur potentiel de conservation et ainsi d'envisager la possibilité de sous- ou surreprésentations en contexte archéologique. Cette donnée, difficilement accessible jusqu'alors, constitue par ailleurs un support de réflexion de nature à étayer nos raisonnements ultérieurs. Les résultats de notre expérimentation sont présentés dans le second point de ce chapitre. Nous évoquons auparavant de manière succincte les caractéristiques physico-chimiques du bois ainsi que leurs modifications au cours de la carbonisation, conduisant à l'apparition d'un nouveau matériau, le charbon de bois.

I. LE CHARBON DE BOIS COMME MATÉRIAU : GÉNÉRALITÉS

I.1. Le matériau bois

I.1.1. Structure anatomique du bois

Le bois croît de manière concentrique. Des couches de cellules nouvelles sont formées entre l'écorce et le bois déjà existant par division cellulaire du cambium. Le bois est ainsi formé de plusieurs couches d'âge et de fonction différente. De l'extérieur vers l'intérieur, on distingue l'écorce ou suber, constitué de cellules mortes, qui assure une fonction protectrice ; le liber, généré comme le bois par l'assise libéro-ligneuse (le cambium), qui permet la circulation de la sève élaborée ; le cambium, dont les cellules, peu différenciées, se divisent pour produire vers l'intérieur des cellules qui se différencient en cellules de xylème secondaire (le bois) et vers l'extérieur en cellules de phloème secondaire (liber) ; l'aubier ou bois jeune est constitué en partie de cellules vivantes, il permet la circulation de la sève brute et l'accumulation des matières nutritives ; au fur et à mesure que l'arbre croît via l'assise libéro-ligneuse, les cellules de l'aubier les plus proches du centre du tronc meurent, elles forment le bois parfait ou duramen qui assure principalement une fonction de soutien. La résistance mécanique et aux agents de pourriture est plus élevée dans le bois parfait, les parois des cellules sont épaissies, l'amidon a disparu, remplacé notamment par des tanins.

L'accroissement du bois dans les régions tempérées se fait de manière saisonnière. Il est important au printemps, ralenti en été, puis interrompu pendant la saison froide, formant ainsi des couches successives appelées « cernes annuels » ou « cernes de croissance » qu'il est parfois possible de distinguer à l'œil nu. Le bois de printemps est dit « bois initial » et le bois d'été, « bois final ». Le bois initial est souvent plus riche en cellules conductrices (vaisseaux), alors que le bois final est plus riche en tissus de soutien (fibres).

Le bois est constitué d'une variété importante de type de cellules de morphologie et de fonction différentes. Les types de cellules varient selon les essences et en particulier entre les feuillus et les conifères.

Les conifères présentent une organisation simple et uniforme. Ils sont constitués principalement de fibres-trachéides qui assurent en même temps les fonctions de soutien et de conduction de la sève. Ils comprennent également des rayons ligneux composés de cellules de parenchyme et parfois des trachéides transversales et des canaux résinifères.

La structure des feuillus est plus complexe. Les fonctions de soutien et de conduction sont assurées par des cellules différentes. Ils sont ainsi composés de vaisseaux et de fibres ligneuses auxquels s'ajoutent des rayons ligneux, du parenchyme et parfois des fibres trachéides et trachéides vasculaires, etc.

Les caractéristiques morphologiques des cellules et leur agencement entre elles forment le plan ligneux d'une espèce. Celui-ci n'est pas homogène entre les différents bois, par contre il est toujours analysé selon trois sections orthogonales : la section transversale, perpendiculaire aux cellules axiales de la tige sur laquelle on peut observer les cernes de croissance du bois ; la section tangentielle, qui est tangente aux cernes de croissance ; la section radiale, orientée de la moelle à l'écorce, qui suit le sens des rayons ligneux. Les propriétés du bois ne sont pas homogènes dans les trois plans, ceux-ci correspondent aux trois directions d'anisotropie du bois.

I.1.2. Composition du bois

I.1.2.1. Composition élémentaire

La composition élémentaire du bois varie assez peu d'une essence à l'autre. Elle se répartit globalement de la manière suivante (en pourcentage de masse du bois anhydre) : le carbone (C) constitue environ 50% de la matière, l'oxygène (O) 42 à 43%, l'hydrogène (H) 6%, l'azote (N) 0.5 à 1%, ainsi que des minéraux sous forme de traces (0.5 à 1% de Calcium, Potassium, Magnésium, Manganèse, Fer, Silicium, etc.).

Ces éléments s'assemblent pour former trois macromolécules principales, la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Le bois est donc un composite de polymères dont les constituants, en proportions variables, forment un réseau rigide et complexe.

I.1.2.2. Constituants organiques

Si la composition élémentaire varie peu, la proportion des trois macromolécules constitutives du bois est variable selon les essences. La cellulose est le constituant le plus important (40 à 50 %), suivie des hémicelluloses (20 à 25 %) et de la lignine (10 à 30 %). Des extractibles (0 à 10 %), substances secondaires variables selon les essences, sont présents en faible quantité ; ce sont des pectines, résines, oléorésines, tannins, matières colorantes, cires, alcaloïdes, acides gras, matières minérales, etc. (Navi et Heger, 2005).

La cellulose est un polymère formé d'une longue chaîne de molécules de glucose. La nature fibreuse du bois résulte de la disposition linéaire, orientée, cristalline de la cellulose.

Les hémicelluloses sont des polymères plus courts. Elles sont de structure amorphe et forment avec la lignine une gangue dans laquelle sont enrobées les fibrilles de la cellulose.

La lignine est un polymère tridimensionnel formant de grosses molécules complexes. Comme les hémicelluloses, sa structure varie entre les essences, et en particulier entre feuillus et conifères.

I.1.2.3. Teneur en eau

Les propriétés physiques du bois sont fortement conditionnées par sa teneur en eau. Les cellules du bois sur pied sont remplies d'eau libre, qui est nécessaire au fonctionnement physiologique du végétal et circule dans les cellules. Le taux d'humidité d'un bois vert peut atteindre des valeurs supérieures à 100%.

Le bois mort ou abattu sèche ; l'eau libre contenue dans les cellules du bois disparaît progressivement. En deçà du point de saturation des fibres (lorsque l'eau libre a entièrement disparue), il ne reste plus que l'eau liée, imprégnant les membranes cellulaires. La quantité d'eau liée varie et s'équilibre selon les conditions atmosphériques. Le bois est dit matériau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il a la capacité de prendre ou perdre de l'humidité en fonction de la température et surtout de l'humidité relative de l'air ambiant.

I.1.3. Propriétés du bois

La variation de la quantité d'eau liée (entre le point de saturation des fibres et l'état anhydre) entraîne des phénomènes de variations dimensionnelles type retrait ou gonflement. Or, le retrait du bois est inégal selon que l'on considère l'un ou l'autre des trois plans anatomiques du bois. C'est un matériau fortement anisotrope.

L'ampleur du retrait varie selon les taxons, mais pour toutes les essences, le retrait tangentiel est prépondérant, le coefficient de retrait radial est environ moitié moins important et le coefficient de retrait longitudinal est d'un ordre de grandeur moins important que les précédents (Guitard, 1987).

Le bois est un matériau poreux. Le degré de porosité est dépendant de la structure anatomique des essences, de même que la densité du bois. Cependant, la densité du bois peut également varier entre les individus d'une même essence comme au sein d'un même individu. Elle est dépendante du degré d'humidité, de la situation géographique, du substrat sur lequel l'arbre a poussé, mais aussi de la situation de prélèvement dans l'arbre. On exprime généralement la densité pour un taux d'humidité égal à 15 % (moyenne entre l'état anhydre et l'état de saturation). La densité influence dans le cas du bois d'autres propriétés, telle la dureté et la résistance à la compression.

Enfin le bois présente également des propriétés combustibles et le pouvoir calorifique varie en fonction du taxon, mais aussi en fonction du taux d'humidité, du calibre des grumes mises au feu et de l'état phénologique et physiologique du bois.

I.2. Du bois au charbon de bois

I.2.1. La carbonisation

La carbonisation correspond à la formation d'un résidu carboné plus ou moins pur par réaction de pyrolyse ou au cours d'une combustion incomplète.

La combustion est une réaction chimique d'oxydo-réduction entraînant une perte de masse par transformation d'une partie de la matière en gaz et vapeur d'eau. La pyrolyse est une décomposition thermique en l'absence ou dans une atmosphère pauvre en oxygène, ne produisant donc pas de flammes, et aboutissant à la formation de produits solides (fortement carbonés), liquides et gazeux.

La décomposition thermique du bois est un processus complexe qui a fait l'objet de nombreuses études (notamment Bilbao, Millera *et al.*, 1989 ; Avat, 1993 ; Grønli, 1996 ; une synthèse bibliographique des études sur la pyrolyse du bois et ses divers composants est proposée in Rousset *et al.*, 2006).

Les études sur la pyrolyse montrent que la dégradation thermique du bois se fait par étapes, en suivant entre autre les paliers de dégradation thermique des divers composants du bois, mais aussi suivant des schémas réactionnels complexes. Les processus en jeu sont aujourd'hui décrits selon des modèles de mécanismes en cascade que nous ne détaillerons pas ici.

De manière très schématique, on peut diviser le processus de dégradation de la matière selon les paliers suivants :

- à partir de 100°C, l'eau contenue dans les tissus du bois se transforme en vapeur. À partir de 150°C, des modifications irréversibles de la matière ligneuse anhydre commencent, se traduisant par une perte de masse.
- en deçà de 230°C, la décomposition des hémicelluloses prédomine.

- entre 230 et 290°C, hémicelluloses et cellulose se décomposent simultanément avec une prédominance de la décomposition de la cellulose à partir de 260°C.
- au-delà de 290°C, lignine et cellulose se décomposent simultanément. Les lignines semblent cependant subir des transformations physiques et des réactions de condensation plutôt qu'une réelle dégradation, celle-ci n'intervenant qu'au-delà de 400°C (Rousset, 2004).
- à partir de 500°C, les composés du bois sont presque entièrement dégradés. Un charbon de bois composé d'environ 95% de carbone est formé.

Du point de vue chimique, la carbonisation n'est donc effective qu'au-delà de 500°C (Byrne and Nagle, 1997 ; Nishimiya *et al.*, 1998 ; Fernandez Ibañez, 2002 ; Braadbart et Poole, 2008). A cette température, le charbon de bois résiduel produit par la pyrolyse représente environ 33% du poids du bois anhydre carbonisé (ce chiffre concerne la production industrielle de charbon de bois). En revanche, en présence d'oxygène, si le processus de combustion est mené à son terme, les charbons de bois se consomment et il en résulte une quantité plus ou moins importante de produits inorganiques solides : les cendres. La formation de charbons de bois en contexte aérobie résulte donc de l'interruption, à un stade plus ou moins avancé, de la combustion (cf. chapitre I, § I.1.2).

I.2.2. Composition physico-chimique du charbon de bois

La composante principale du charbon de bois est évidemment le carbone, mais pas seulement. Il contient également des matières volatiles et minérales.

Les matières volatiles contenues dans le charbon de bois comprennent tous les résidus liquides et goudronneux qui ne sont pas totalement éliminés lors de la carbonisation. Les substances goudronneuses se décomposent en élevant la température. Plus celle-ci est élevée et la carbonisation longue, plus la teneur en matières volatiles est faible. La proportion de carbone augmente d'autant, mais le rendement en charbon diminue.

La teneur en carbone pur du charbon de bois peut ainsi varier de 50% à 95%.

La teneur en cendres du charbon de bois varie entre 0,5% et 5% selon l'essence. Les cendres sont composées de matières minérales telles que carbonates de sodium et potassium, silice,

oxydes de calcium, magnésium, etc., présentes à l'origine dans le bois. L'écorce a une teneur en cendres beaucoup plus importante.

Enfin, un certain taux d'humidité persiste, il peut atteindre à terme 10 % de la masse totale (archives de la FAO, 1983).

Du point de vue structurel, le charbon de bois comprend une phase cristalline composée de microcristallites graphitiques et une phase amorphe, non organisée. La structure du matériau est en partie susceptible de varier en fonction du taxon et de la température de carbonisation (cf. Chapitre I, § II.3).

II. CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DU CHARBON DE BOIS : APPROCHE EXPÉRIMENTALE

II.1. Matériel et méthode (annexes, planche 1')

L'expérimentation en conditions contrôlées de laboratoire est une méthode classiquement utilisée pour la caractérisation des matériaux. Chacun en connaît les limites. Il est bien évident que cette démarche ne peut en aucun cas reproduire la variété et la complexité des phénomènes auxquels les charbons de bois ont pu être soumis au cours de leur enfouissement, ni encore moins les effets combinés des différents processus ou leur durée. Toutefois, c'est le seul moyen de produire une donnée standardisée permettant de définir les propriétés physiques du charbon de bois tout en prenant en compte séparément les effets des différentes étapes de la fragmentation.

Les tests mécaniques ont été réalisés à l'École des Mines (ParisTech ; Sophia-Antipolis, France) au Centre de Mise en Forme des matériaux (CEMEF). Ils ont pour but de caractériser le module d'élasticité et les modalités quantitatives (nombre de fragments) et qualitatives (taille des fragments) de la fragmentation.

II.1.1. Fabrication des échantillons

Les tests ont porté sur des échantillons carbonisés de dix essences communes fréquemment retrouvées en contexte archéologique : *Acer pseudoplatanus*, *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Populus tremula*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Quercus pubescens*. Le bois, sec à l'air (12% d'humidité) provient de branches de 10 à 15 cm de section.

La fabrication des échantillons tient compte à la fois (i) des contraintes de forme des échantillons destinés aux essais mécaniques et (ii) de l'effet de l'altération physico-chimique des propriétés mécaniques du matériau pendant la combustion. Elle doit admettre une forme de standardisation un peu éloignée des contextes archéologiques que l'on étudie : les échantillons pour des essais de compression doivent présenter deux faces parallèles parfaitement usinées et sans altération structurale de type fissure.

La production de cubes usinés, de 2cm de côté, non fissurés par la carbonisation, est une des contraintes de notre protocole. Afin de limiter la déformation des échantillons pendant la carbonisation, chaque cube est emballé dans du papier d'aluminium, placé dans un creuset en céramique, recouvert de sable puis carbonisé en four à moufle. Les cubes ne sont pas repris par un usinage après carbonisation, les deux faces au contact des plateaux de compression ne sont donc plus strictement planes ni parallèles.

II.1.2. Température de carbonisation

La température de carbonisation a une incidence directe sur la résistance mécanique des charbons de bois en raison de la dégradation progressive et par paliers des constituants du bois sous l'effet de la chaleur (Hillis, 1984 ; Fengel et Wegener, 1989 ; Yildiz, 2006 ; Gündüz, 2008 ; Süleyman Korkut *et al.*, 2008, 2009 ; Borrega, 2008 ; Mburu, 2008 ; Kocaefe, 2010 ; Majano-Majano, 2012 ; Poletto *et al.*, 2012). Par conséquent, le choix des températures doit tenir compte à la fois des différentes étapes de la dégradation thermique du bois (cf. *infra*), mais doit également faire écho aux températures potentielles de foyers archéologiques de type structure ouverte.

Dans un foyer ouvert, la température est une mesure très fluctuante. Elle varie dans la durée, mais aussi à l'intérieur même de la structure. Les expériences de combustion en foyer ouvert montrent que les températures maximales peuvent atteindre 900°C, mais localement et sur une très courte durée. En moyenne, les températures se situent autour de 400°C (Théry-Parisot *et al.* 2010 b ; Costamagno *et al.*, 2010).

Ainsi, en prenant en considération les paliers thermiques de formation du charbon et la gamme des températures atteintes dans une structure de combustion ouverte, nous avons choisi de tester trois températures de carbonisation : 400, 500 et 750 °C.

Les carbonisations ont été menées à la chaîne. Les creusets de céramiques sont placés dans le four déjà chaud pendant 30 minutes à l'exception des échantillons carbonisés à 750°C, pour lesquels la durée a dû être réduite à 20 minutes, faute de quoi les échantillons présentaient des altérations structurales impropres à la réalisation des essais.

Sur les 400 échantillons préparés, 302 ont pu être exploités, soit une perte de l'ordre de 25% principalement sur les lots carbonisés à 400° et à 750°C. Les tests portent sur 30 échantillons par essence en moyenne et pour chaque essence en moyenne respectivement 9.1, 15.6 et 5.5 pour les températures 400°C, 500°C, 750°C.

II.1.3. Mesure de la porosité

Des mesures systématiques de la porosité moyenne ont été réalisées par analyse d'image à partir de photo MEB de notre matériel expérimental (cf. Chapitre II, § II.2.). La valeur prise en considération dans ce travail est un indice correspondant à la différence de porosité entre le bois initial et final (annexe I, fig. 3). Cette mesure permet d'évaluer les relations résistance/fragmentation/porosité des échantillons.

II.1.4. Tests de compression

Les compressions ont été réalisées avec une machine de traction-compression hydraulique équipée d'un capteur 10 kN, la force étant appliquée dans l'axe des fibres. La vitesse de descente a été fixée à 0.1 mm/s pendant 30 secondes à partir du contact avec l'échantillon qui est posé sur la face transversale.

La force appliquée et la diminution de hauteur de l'échantillon (déplacement du plateau) qui en résultent sont enregistrées pendant les essais. Ces valeurs permettent de tracer les courbes contrainte (MPa)-déformation (%), en divisant la force par la surface de la face transversale de l'échantillon (contrainte), d'une part, et le déplacement par la hauteur de cet échantillon (déformation), d'autre part.

La figure 2 représente une courbe typique des essais. Elle comporte trois grandes parties :

- une montée très lente de l'effort après le premier contact, qui correspond à la mise en place de la compression
- une montée rapide et linéaire de l'effort jusqu'à un maximum qui correspond à l'écrasement de l'échantillon dans son ensemble
- une chute plus ou moins brutale de l'effort, avec éventuellement des efforts de trainée non négligeables, correspondant à la ruine du charbon

Il faut noter qu'il n'y a jamais réversibilité dans la compression, il ne s'agit donc pas d'un phénomène élastique.

Cette courbe permet de calculer plusieurs indicateurs mécaniques dans la phase 2 : la contrainte maximale appelée « crushing strength » (CS en MPa), la pente de la droite appelée « crushing modulus » (CM en MPa), la déformation qui correspond à une montée linéaire depuis zéro jusqu'à CS avec la pente CM (CS/CM) appelée « theoretical crushing strain » (TS).

- « Crushing strength » (CS) est directement lié à la force maximale (pression) supportée par le cube de charbon avant sa rupture irréversible. Si CS est bas, l'échantillon est moins résistant à la compression.
- « Theoretical crushing strain » (TS) est principalement lié au temps nécessaire à la rupture complète du charbon. Si TS est bas, l'échantillon est moins résistant à la compression.
- « Crushing modulus » (CM), comme tous les modules, relie la contraction du charbon à la force qui s'exerce sur lui au cours de la compression. Si CM est bas, l'échantillon est moins rigide en compression.

- Enfin, parce que le bois comme le charbon sont des matériaux à structure alvéolaire, leurs propriétés mécaniques dans la direction du fil sont globalement proportionnelles à leur densité (Gibson et Ashby, 1999). Il est dès lors intéressant d'utiliser la « résistance spécifique » (specific crushing strength), soit la contrainte maximale (CS) divisée par la densité du charbon (CS/WCD exprimé en $10^3 m^2/s^2$), comme critère indépendant de la densité elle-même.

La pression induit la fragmentation des échantillons. A l'issue des tests, le comptage des fragments est réalisé par analyse d'image (Logiciel libre ImageJ ; cf. Chapitre II, § II.1.) après tamisage systématique des résidus de chaque essai selon trois mailles de tamis : [1-2mm] , [2-4mm] , > 4mm.

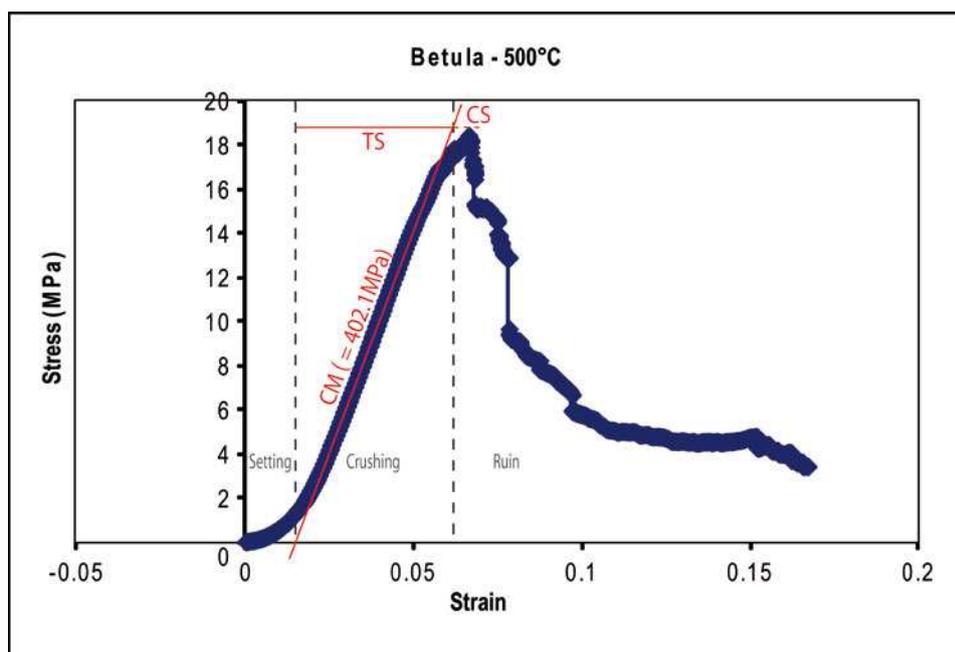


Figure 2 : Courbe contrainte-déformation typique comprenant les trois principales phases de l'essai (mise en place, écrasement, ruine) et permettant de calculer les principaux indices mécaniques (contrainte maximale : CS ; Module d'écrasement : CM ; Déformation théorique : TS)

II.1.5. Construction de la base de données

Pour chaque échantillon, la masse (M pour le bois sec et MC pour le charbon de bois) et les dimensions du cube dans les 3 directions ont été mesurées à l'état sec à l'air, puis à

l'état carbonisé. Cela permet de calculer le volume (V et VC), la densité par la formule $D=M/V$ (WD pour le bois sec, WCD pour le charbon de bois), la perte de masse $(M-MC)/M$ ($Mloss$ en %), la perte de volume $(V-VC)/V$ ($Vloss$ en %) et la perte de densité $(WD-WVD)/WD$ ($Dloss$ en %).

La température de carbonisation, la plus ou moins grande proximité du cube avec le cœur du rondin ainsi que les éventuelles déformations post-combustion ont été répertoriées. Ces données préparatoires, les mesures de porosité ainsi que les données issues de l'expérimentation (nombre de fragments par classe de taille, contrainte maximale supportée (CS), déformation subie (TS) et « module d'écrasement » (CM) correspondant pour chaque échantillon) ont alimenté une base de données générale. À terme, un certain nombre de caractéristiques anatomiques propres aux essences ont été intégrées à la base afin de permettre la réalisation d'analyses multivariées³.

³ Tout au long du chapitre, et de manière à ne pas encombrer notre propos, nous traitons uniquement des variables ayant une réelle incidence sur les propriétés mécaniques et/ou sur la fragmentation des charbons de bois. Par exemple, la plus ou moins grande proximité du cube par rapport au cœur du rondin n'a pas d'effet sur la fragmentation et un effet extrêmement réduit sur la résistance du matériau.

II.2. Résultats

II.2.1. Valeurs brutes moyennes (tableau 1)

SPECIES	T°	Nb	WD	WCD	Mloss	Vloss	Dloss	>4mm	2-4mm	1-2mm	Total	CM	CS	TS	CS/WCD	Means	
																CS	CM
<i>Acer</i>	400	9	0.65	0.41	0.68	0.49	0.37	20	52	82	154	461	19.8	0.044	48.6	18.9	429
	500	16	0.65	0.39	0.71	0.51	0.40	19	66	105	189	437	19.9	0.046	51.0		
	750	4	0.64	0.28	0.81	0.58	0.54	19	61	87	167	324	13	0.038	42		
<i>Betula</i>	400	9	0.59	0.40	0.69	0.55	0.32	17	34	96	147	501	20.4	0.041	51.3	16.1	407
	500	15	0.59	0.36	0.74	0.56	0.39	15	41	136	191	426	16.7	0.039	46.1		
<i>Carpinus</i>	750	5	0.60	0.27	0.84	0.64	0.55	17	33	106	156	181	6.9	0.037	25.5	19.4	557
	400	11	0.73	0.54	0.70	0.59	0.26	20	45	156	221	548	20.6	0.042	38.1		
<i>Corylus</i>	500	15	0.73	0.49	0.74	0.62	0.33	16	44	160	220	591	19.9	0.033	40.9	17.2	394
	750	2	0.74	0.44	0.82	0.68	0.42	15	40	114	169	356	9.5	0.030	22.3		
<i>Fagus</i>	400	7	0.60	0.43	0.68	0.55	0.28	17	48	137	202	475	22.5	0.049	51.7	13.9	402
	500	16	0.68	0.41	0.71	0.52	0.39	17	43	71	131	436	14.2	0.033	33.9		
	750	4	0.69	0.33	0.81	0.58	0.53	17	44	69	129	258	9.6	0.037	28.3		
<i>Fraxinus</i>	400	11	0.72	0.52	0.60	0.45	0.27	20	47	141	207	437	12.9	0.031	24.7	11.8	390
	500	14	0.74	0.45	0.71	0.52	0.40	16	64	210	290	406	12.4	0.034	27.8		
<i>Pinus pinaster</i>	750	7	0.76	0.32	0.82	0.58	0.58	17	50	149	216	286	8.8	0.030	25.5	12.4	320
	400	8	0.54	0.34	0.62	0.40	0.37	17	41	66	124	351	19.0	0.056	56.2		
	500	16	0.60	0.35	0.68	0.45	0.41	22	63	102	187	357	11.3	0.037	32.6		
<i>Pinus sylvestris</i>	750	6	0.52	0.23	0.80	0.55	0.56	22	58	78	157	181	6.4	0.037	27.8	9.6	272
	400	8	0.52	0.36	0.63	0.46	0.31	24	48	73	144	345	12.7	0.042	35.5		
<i>Populus</i>	500	16	0.52	0.31	0.70	0.50	0.40	19	62	108	189	284	10.2	0.039	32.9	11.2	283
	750	7	0.54	0.23	0.82	0.56	0.58	18	58	100	176	164	4.6	0.028	19.6		
	400	8	0.49	0.33	0.68	0.53	0.32	14	28	45	87	377	15.6	0.049	46.7		
<i>Quercus</i>	500	16	0.49	0.28	0.74	0.55	0.42	13	33	54	100	295	11.8	0.041	41.5	8.1	281
	750	7	0.48	0.20	0.83	0.58	0.58	19	42	60	121	138	4.1	0.029	19.8		
Means	400	8	0.91	0.51	0.63	0.34	0.44	40	75	139	255	337	10.4	0.033	20.8	750	55
	500	16	0.93	0.46	0.66	0.31	0.50	35	88	144	267	285	7.8	0.028	17.1		
	750	7	0.85	0.32	0.81	0.48	0.62	23	60	97	180	165	4.3	0.027	13.5		
T°	T°	Nb	WD	WCD	Mloss	Vloss	Dloss	>4mm	2-4mm	1-2mm	Total	CM	CS	TS	CS/WCD		
	400	91	0.66	0.44	0.66	0.49	0.32	21	46	103	170	426	16.7	0.042	39.3		
	500	155	0.66	0.39	0.71	0.51	0.40	19	56	124	200	394	14.4	0.038	37.2		
	750	55	0.64	0.28	0.82	0.58	0.56	19	50	97	165	210	6.6	0.031	23.2		

Tableau 1: Valeurs moyennes des propriétés mécaniques et de la fragmentation des 10 essences selon les 3 températures de carbonisation. Abréviations : Nb : nombre d'échantillon ; WD : masse volumique du bois ; WCD : Masse volumique du charbon de bois ; Mloss : perte de masse ; Vloss : perte de volume ; Dloss : perte de masse volumique ; >4mm, 2-4mm, 1-2mm : nombre de fragments par classe de taille ; Total : nombre total de fragments ; CM : module d'écrasement ; CS : contrainte maximale ; TS : déformation théorique ; CS/WCD : résistance spécifique

II.2.2. Propriétés physiques et mécaniques

II.2.2.1. Masse, volume et masse volumique

Dans nos essais, la carbonisation induit à la fois une perte de masse, une perte de volume et une perte de masse volumique sévères.

Si l'on retire la perte d'eau du bois en début de carbonisation (12% en moyenne), la perte de masse (Mloss) est voisine de 55% à 400°C, 60% à 500°C et 70% à 750°C en moyenne. Il n'y a pas de différences systématiques très sensibles entre essences.

La perte de volume (Vloss), de l'ordre de 50% à 400 et 500°C, monte à 58% à 750°C, ce qui est considérable en comparaison du retrait hygroscopique entre bois sec à l'air et le bois anhydre (de l'ordre de 6 à 8%). Il y a cette fois des différences systématiques notables entre espèces, *Quercus pubescens* ayant toujours le plus faible retrait volumique et *Carpinus betulus* le plus fort.

La perte de masse volumique (Dloss) augmente nettement avec la température (Fig. 3a). Elle passe de 32% à 400°C, à 40% à 500°C, pour atteindre 55% à 750°C. La perte de masse volumique moyenne est de 40 % avec une variation de 33 à 50 % selon les essences (Fig. 3b), *Quercus* et *Carpinus* se positionnant aussi aux extrêmes (*Quercus* enregistre une perte de masse volumique beaucoup plus importante que les autres essences – ce qui tend à le faire rentrer dans la moyenne –, alors que celle de *Carpinus* est bien inférieure).

La carbonisation tend à homogénéiser les différences de densité entre essences mais la masse volumique du charbon reste globalement proportionnelle à la masse volumique initiale du bois (Fig. 3c). Un test de corrélation de Spearman⁴ indique une corrélation positive significative entre les deux séries de valeurs ($\rho = 0.69$ / $p\text{-value} < 2.2 \times 10^{-16}$).

⁴ Les résultats des divers tests de Spearman sont présentés en annexe II., fig. 9

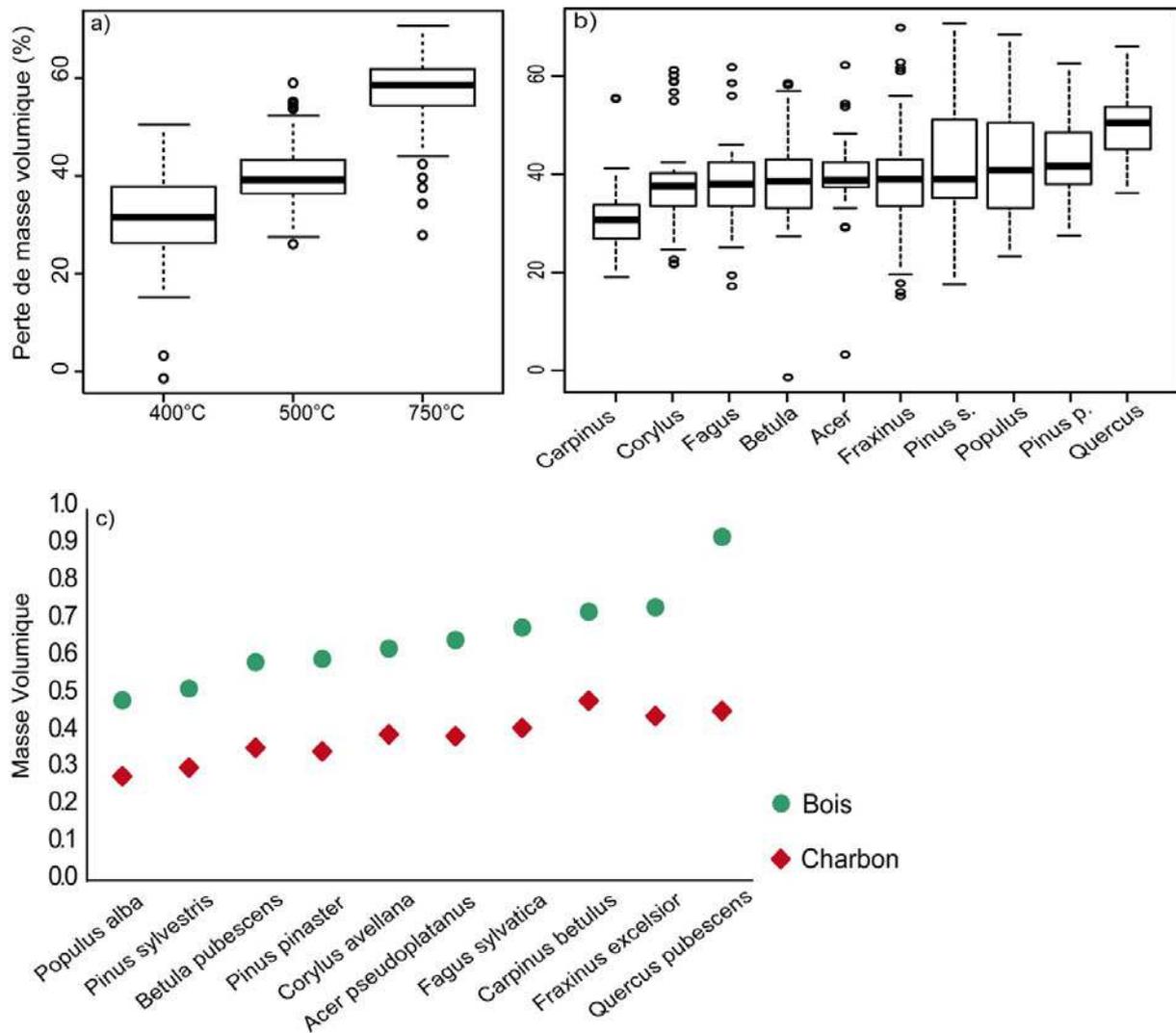


Figure 3 : a) perte de masse volumique par température de carbonisation, b) par espèce, c) masse volumique du bois et du charbon de bois par espèce

II.2.2.2. Contrainte à la rupture, module et déformation d'écrasement

- *Effet Température*

Comme pour les propriétés physiques, les trois indicateurs mécaniques considérés évoluent sensiblement avec la température : tous trois décroissent quand la température de carbonisation augmente, la contrainte maximale (CS) étant la plus affectée.

La contrainte maximale supportée (CS) passe en moyenne de 16,9MPa à 400°C, à 14,5MPa à 500°C et 6,9MPa à 750°C (Fig. 4c). Le module d'écrasement (CM) diminue assez peu entre 400°C (424 MPa) et 500°C (396 MPa) mais chute presque de moitié à 750°C (220 MPa) (Fig. 4a).

Quant à la déformation théorique d'écrasement (TS), elle diminue régulièrement de 4,3% à 400°C à 3,2% à 750°C, en passant par 3,8% à 500°C (Fig. 4e).

D'après ces résultats, il apparaît que les charbons sont moins résistants et plus fragiles quand la température augmente.

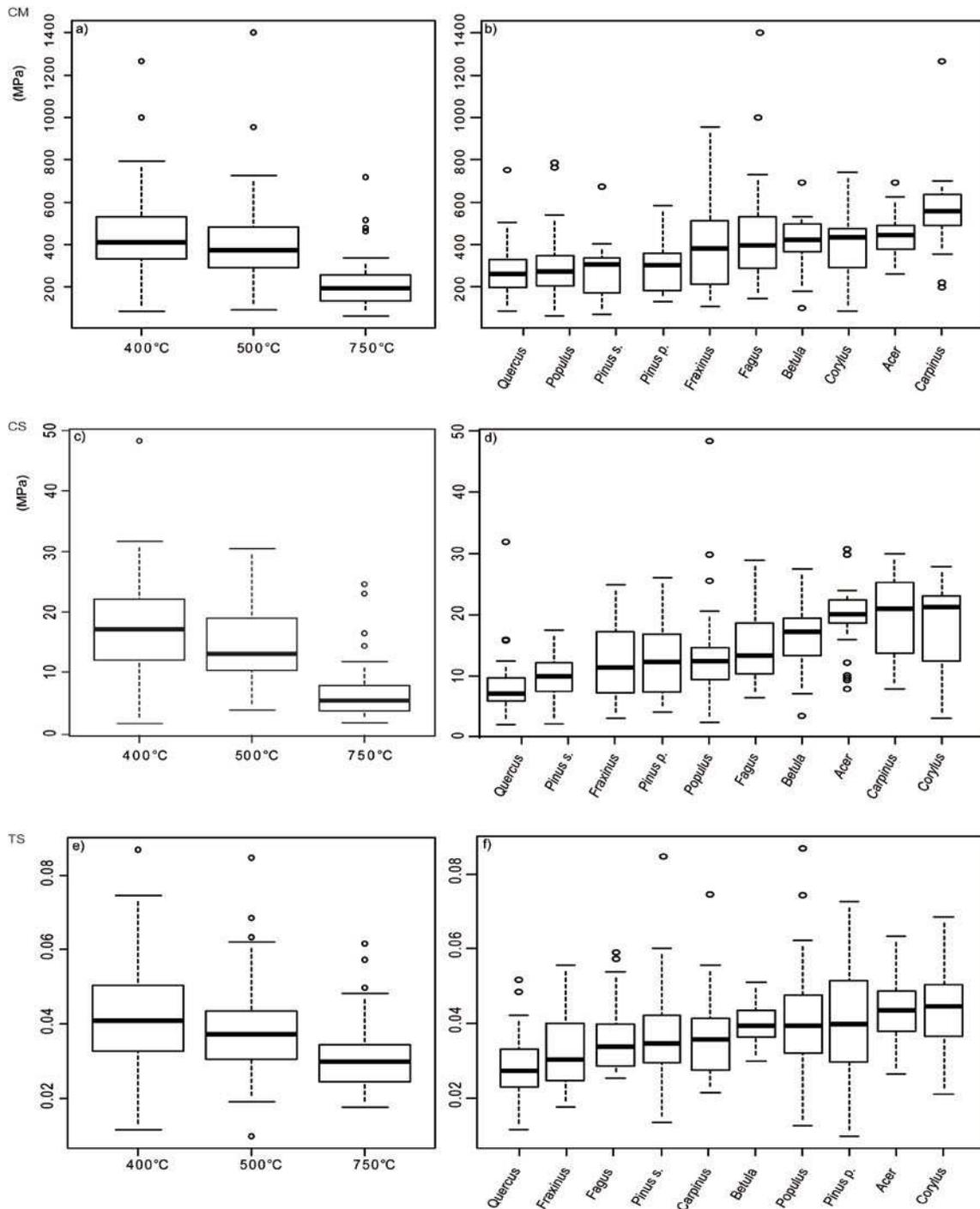


Figure 4 : Valeurs moyennes des principaux indicateurs des propriétés mécaniques par température de carbonisation et par espèce : a et b) Module d'écrasement (crushing modulus : CM) ; c et d) Contrainte maximale (crushing strength : CS) ; e et f) Déformation théorique (theoretical crushing strain : TS)

- *Effet Essence*

Les trois indicateurs varient également en fonction de l'essence (Fig. 4b, 4d et 4f), ce qui explique en partie les écarts-types importants observés pour l'effet température. Les échantillons carbonisés à 500°C étant à la fois plus nombreux et en nombre plus constant pour chaque taxon, nous utilisons les valeurs moyennes obtenues à cette température pour comparer les espèces. Les différences entre taxons sont significatives, elles s'échelonnent entre 285 MPa pour *Quercus* et 591 MPa pour *Carpinus* (module d'écrasement, CM) et de 7.8 MPa pour *Quercus* à 20.3 MPa pour *Corylus* (contrainte à la rupture, CS). La déformation théorique (TS) varie entre 2.8% pour *Quercus* et 4.7% pour *Corylus*. *Quercus* est de loin l'espèce la moins résistante et la plus fragile, tandis qu'*Acer*, *Carpinus* et *Corylus* sont plus résistants et moins fragiles.

- *Interaction des effets Température et Essence*

L'augmentation de la température induit globalement la diminution de la résistance du matériau (CS) quelle que soit l'espèce. Cette perte de résistance est en partie due à la perte de densité du charbon. En revanche, la modification des propriétés mécaniques intervient à des seuils thermiques différents selon les essences (Fig. 5).

Par exemple, le charbon de chêne formé à 400°C est déjà largement fragilisé (contrainte à la rupture inférieure ou égale à 10 MPa quelle que soit la température de carbonisation considérée) alors que le noisetier est encore très résistant (22.5 MPa). De même, si la résistance de toutes les essences diminue énormément lorsque la carbonisation atteint 750°C, celle-ci ne chute que de 45% dans le cas d'*Acer* alors qu'elle est divisée par quatre pour *Populus*.

L'interaction température/taxon laisse apparaître quatre ensembles principaux de taxons :

- ensemble 1 : *Acer*, *Betula*, *Carpinus* et *Corylus* sont les taxons les plus résistants. Leur seuil de rupture varie très peu entre 400 et 500°C. Il ne décroît réellement qu'à partir de 750°C tout en restant globalement plus important que celui des autres essences à cette température.

- ensemble 2 : *Pinus pinaster* et *Populus* sont presque aussi solides que le groupe précédent à 400°C, en revanche leur seuil de rupture chute fortement à partir de 500°C ; il est très faible à 750°C.
- groupe 3 : *Pinus sylvestris*, et plus encore *Quercus*, présentent des valeurs très basses même à 400°C. Leur résistance est quasi identique à 500°C, elle est très basse à 750°C.
- groupe 4 : *Fagus*, et *Fraxinus* ont une résistance moyenne mais ils sont moins sensibles à la température et se retrouvent dans le peloton de tête avec le groupe 1 à 750°C.

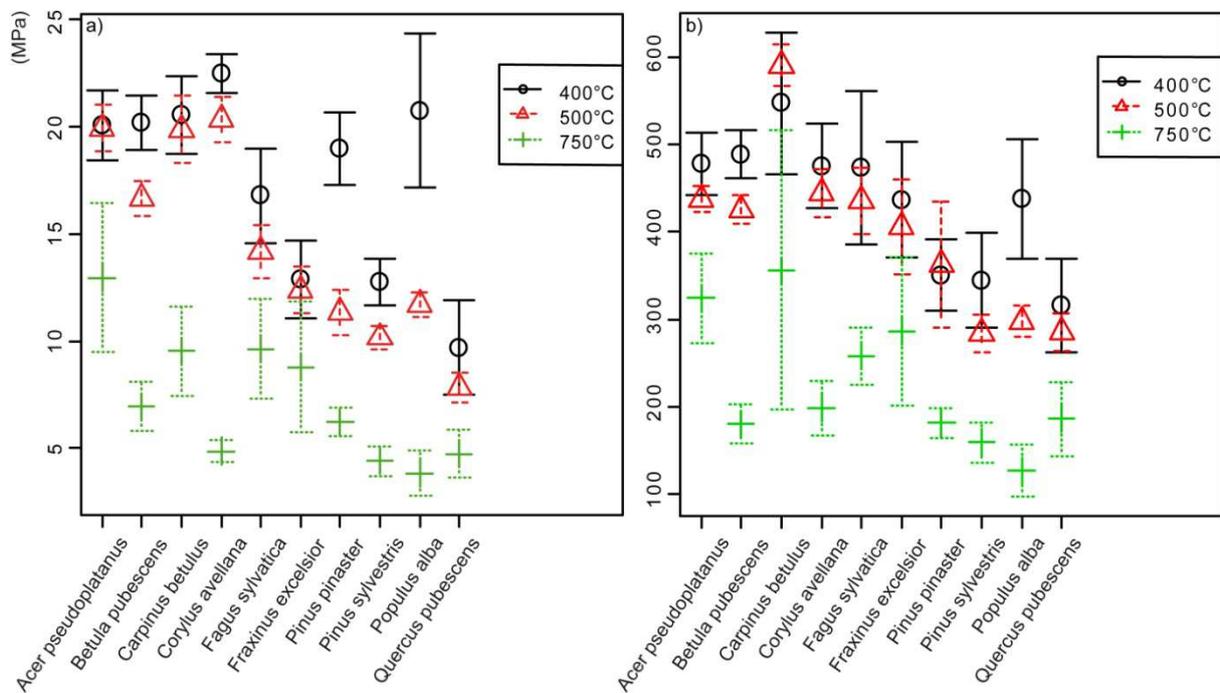


Figure 5 : Interactions des effets température et essence sur les propriétés mécaniques. a) contrainte maximale ; b) Module d'écrasement

II.2.2.3. Résistance spécifique (fig. 6)

Dans le cas des bois secs à l'air, la résistance en compression axiale est proportionnelle à la densité avec un coefficient de régression R^2 qui dépasse 0,88 pour plus de 200 essences représentées par au moins 4 arbres et 40 éprouvettes mesurées (base de données Cirad, TROPIX® 7, 2011) : $CS = 84,7 * WD$. Le rapport CS/WD est appelé résistance

spécifique (rapportée à la densité) et il varie très peu entre des espèces dont la densité varie de 0,2 à 1,2.

Il est donc intéressant de calculer la résistance spécifique des charbons (rapport entre la résistance à l'écrasement et la densité du charbon de bois : CS/WCD). Cette résistance spécifique des charbons de bois est par contre très variable.

Les valeurs, comparées à 84.7, donnent une idée de la perte de résistance du charbon par rapport au bois sec. En moyenne cette perte est d'environ 60 % pour 400°C et 500°C et atteint 77% à 750°C. La perte de résistance est très variable en fonction de l'essence. En examinant les résultats à 500°C, pour lesquels il y a chaque fois de 14 à 18 données, plusieurs ensembles de taxons apparaissent :

- ensemble 1 : *Acer*, *Betula* et *Carpinus*, *Corylus*, et *Populus* ont perdu de 40% à 50% de résistance ;
- ensemble 2 : *Fraxinus*, *Fagus*, *Pinus sylvestris*, *P. pinaster* ont perdu entre 60% et 70% ;
- ensemble 3 : *Quercus* a perdu 80% de résistance.

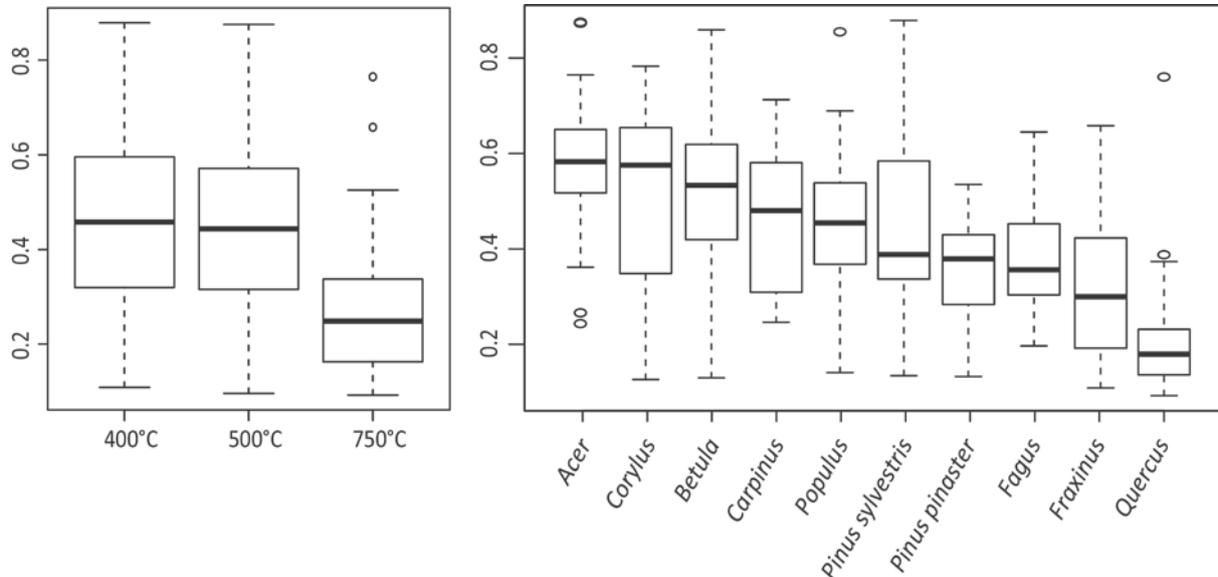


Figure 6 : Résistance spécifique par température de carbonisation et par taxon

II.2.2.4. Propriétés mécaniques et perte de masse volumique

Les tests statistiques réalisés montrent qu'il existe, comme dans le cas du bois, un lien fort entre propriétés mécaniques et perte de masse volumique.

Il existe en effet une corrélation négative significative entre la perte de masse volumique et le module d'écrasement (Spearman : $\rho = -0.612$ / $p\text{-value} < 2.2 \times 10^{-16}$) et la contrainte maximale (Spearman : $\rho = -0.669$ / $p\text{-value} < 2.2 \times 10^{-16}$). Plus la perte de masse volumique est importante, plus le module d'écrasement et la contrainte à la rupture sont faibles. Inversement et de manière logique, on observe une corrélation positive significative entre perte de masse volumique et perte de résistance à la rupture (Spearman : $\rho = 0.652$ / $p\text{-value} < 2.2 \times 10^{-16}$). La perte de masse volumique induit en grande partie la perte de résistance à la rupture des charbons de bois.

II.2.3. Fragmentation

La carbonisation, si elle tend à niveler les différences initialement existantes entre les différents bois, ne produit pas pour autant un matériau homogène. Les propriétés mécaniques des charbons de bois restent, nous l'avons vu, variables selon les essences testées. Mais ces différences de comportement mécanique induisent-elles également des différences de fragmentation ? Une étude détaillée de la fragmentation, ses modalités et ses liens éventuels avec les propriétés mécaniques des différentes essences a été menée.

II.2.3.1. Nombre total de fragments

- *Effet de la température*

Au terme des tests de compression, les échantillons produisent en moyenne, 160 fragments à 400°C, 200 fragments à 500°C et 160 fragments à 750°C. Les combustions à 500°C produisent en moyenne plus de fragments que celles à 400 et 750 °C (fig. 7a). **La relation température/nombre de fragments n'est donc pas linéaire** dans nos essais. Ce résultat surprenant est sans doute lié aux différents stades de dégradation de la matière organique au cours de la combustion. À 400°C, les cubes ne sont pas toujours parfaitement carbonisés. La lignine n'est pas encore totalement dégradée et leur comportement mécanique est encore proche de celui du bois. Les cubes ont tendance à se rompre en quelques morceaux seulement après de fortes pressions. À 500°C en revanche, les cubes

sont totalement carbonisés mais, bien que fragilisés, ils gardent une certaine résistance. Ils ont alors tendance à exploser en créant de nombreuses petites particules et quelques gros fragments. Inversement, à 750°C, le matériau est très dégradé. Les cubes, très fragiles, se rompent rapidement sous les premières pressions en suivant les zones de fragilité internes (zones de retrait) générées par la carbonisation. Ils produisent en moyenne moins de fragments.

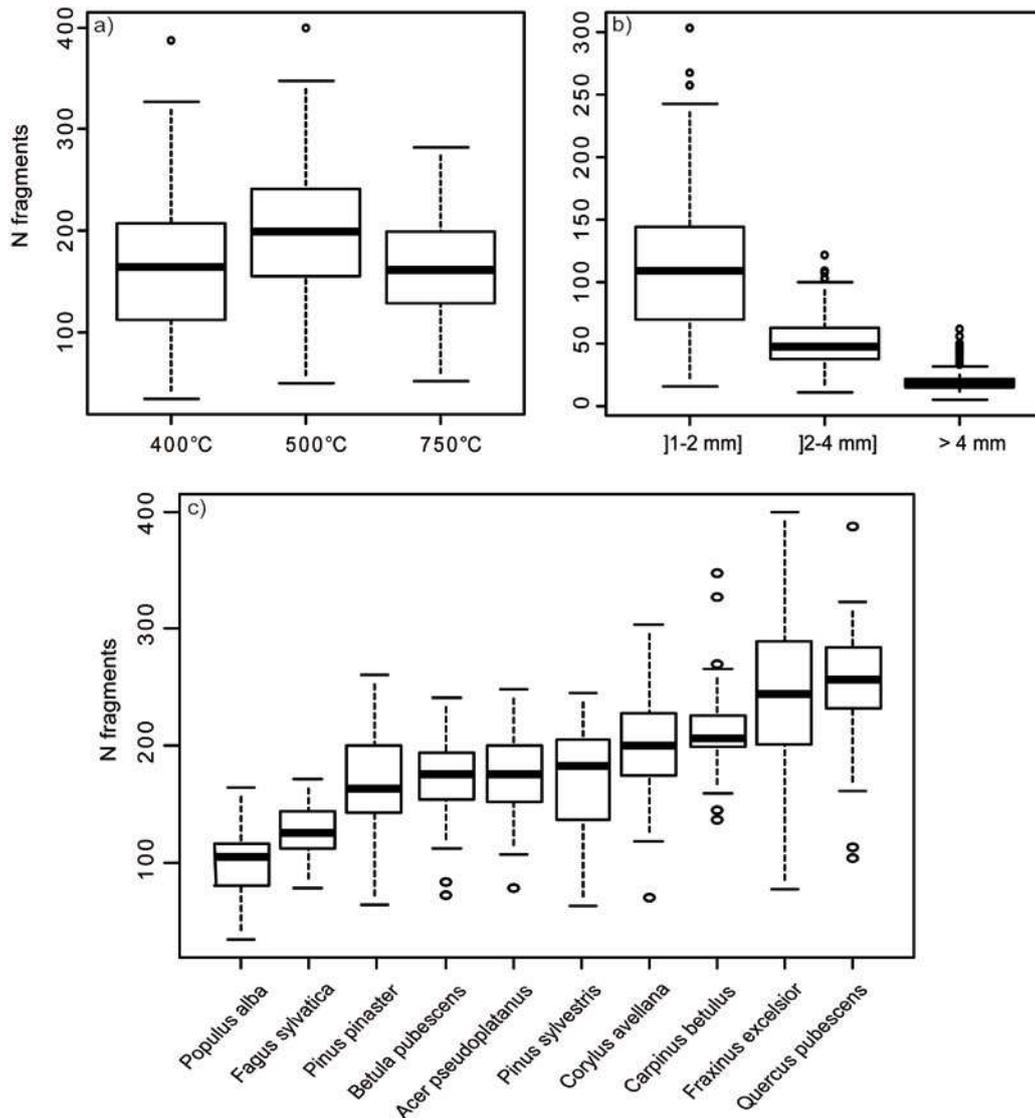


Figure 7 : Nombre total de fragments : a) par température de carbonisation ; b) par classe de taille ; c) par taxon

- *Effet de l'essence*

Le nombre total de fragments (toutes tailles confondues) par espèce présente une forte variabilité (fig. 7c), allant de 34 fragments pour *Populus* à 400 pour *Fraxinus*. La moyenne la plus faible est de 98 fragments pour *Populus* et la plus haute de 250 pour *Quercus pubescens*. La variabilité liée à la température explique en partie les écarts type de chaque essence.

Les différences entre essences sont significatives comme le montre le résultat du test non-paramétrique de Kruskal-Walis (Fig. 8a). Le test bilatéral de comparaisons par paires (procédure de Dunn, seuil de significativité de Bonferroni = 0.0011 [tableau des p-values en annexe II, fig. 4]) met en évidence des groupes d'essences au comportement proche (figure 8b). Le test fait apparaître **quatre groupes A, B, C, D, qui se recoupent partiellement**, notamment en raison de la variabilité due à l'effet température.

Aux extrémités, *Populus* se fragmente moins que les autres taxons et *Quercus* et *Fraxinus* se fragmentent plus. Ces essences sont celles qui présentent le plus grand nombre de différences significatives avec les autres. Entre ces deux extrêmes, *Fagus* est l'essence qui se rapproche le plus de *Populus*, suivi d'un groupe composé de *Pinus pinaster*, *Acer* et *Betula*. *P. sylvestris*, *Corylus*, *Carpinus* ont une tendance à la fragmentation légèrement plus élevée, les deux derniers ne présentent pas de différences statistiquement significatives avec *Fraxinus* et *Quercus*

		ESPECES	Moyenne des rangs	Groupes			
		<i>Populus</i>	36.948	A			
		<i>Fagus</i>	63.224	A B			
		<i>Pinus pinaster</i>	123.672	B C			
		<i>Acer</i>	132.293	B C			
		<i>Betula</i>	132.362	B C			
		<i>Pinus sylvestris</i>	135.241	C			
		<i>Corylus</i>	180.207	C D			
		<i>Carpinus</i>	194.500	C D			
		<i>Fraxinus</i>	216.052	D			
		<i>Quercus pubescens</i>	240.500	D			
K (Valeur observée)		152.957					
K (Valeur critique)		16.919					
DDL		9					
p-value (bilatérale)		< 0.0001					
alpha		0.05					

a) Test de Kruskal Walis

b) Comparaisons par paires (procédure de Dunn)

Figure 8 : Différences statistiques de fragmentation entre les taxons

- *Hiérarchisation des effets température et essence*

Nous avons vu que les variables « température » et « essence » agissent sur la fragmentation. Un test d'ANOVA permet de hiérarchiser les effets de ces deux variables. Les résultats indiquent un lien fort entre l'essence et l'intensité de la fragmentation : 49.7 % (R^2) de la variation du modèle est expliquée par le facteur « ESSENCE ». Les deux facteurs sont incidents, mais la valeur de F et la somme des carrés pour le facteur ESSENCE sont plus importants (fig. 9). Les deux facteurs et leurs effets conjoints expliquent 61,5 % de la variabilité totale. Cependant, l'interaction ESSENCE * TEMPÉRATURE n'est pas ou peu incidente (valeur de F non significative).

Variable	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
ESSENCE	9	671386.878	74598.542	40.762	< 0.0001
TEMPÉRATURE	2	91702.922	45851.461	25.054	< 0.0001
ESSENCE*TEMPÉRATURE	18	68889.679	3827.204	2.091	0.006

Figure 9 : Analyse de variance de la fragmentation en fonction des variables essence et température de carbonisation

L'histogramme synthétique (fig. 10) présentant le nombre total de fragments produits par la compression selon l'essence et la température met clairement en évidence le **rôle prépondérant du taxon sur le phénomène de fragmentation**. À de rares exceptions près (500°C / *Fraxinus*), la variabilité visible est bien plus importante entre essences qu'entre températures.

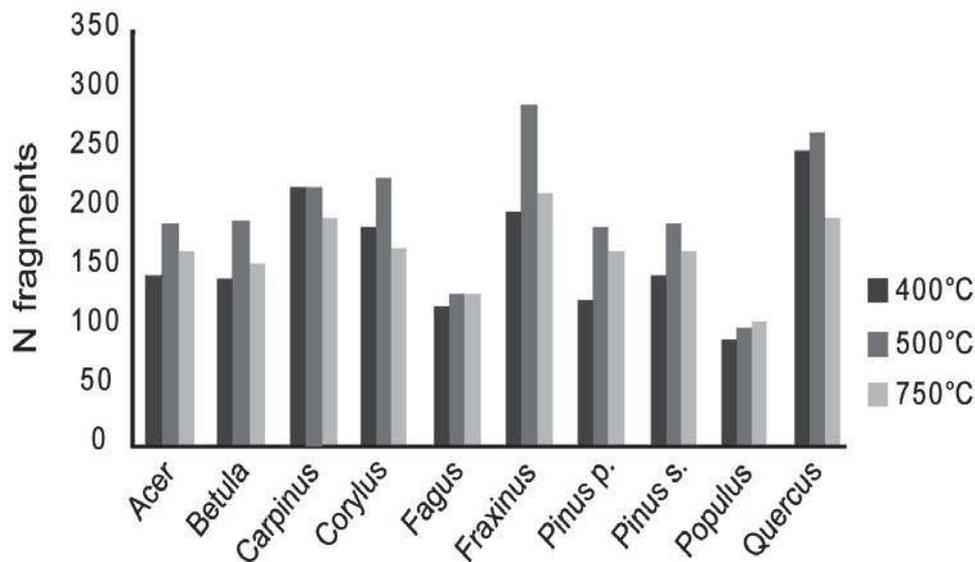


Figure 10 : Histogramme synthétique du nombre de fragments par taxon et par température de carbonisation

II.2.3.2. Modalités de la fragmentation

Jusqu'à présent nous avons décrit la fragmentation moyenne des essences testées. Or, celle-ci n'est pas homogène. Une variabilité importante a été mise en évidence d'où il ressort que *Quercus* et *Populus* ont un comportement opposé, qui diffère de la majorité des espèces. Les autres essences se répartissent autour de deux groupes médians. Nous allons maintenant observer les modalités de la fragmentation au sein des trois classes de taille de fragments considérées :]1-2mm] ,]2-4mm] , > 4mm.

- *Répartition en classes de tailles*

La première observation concerne l'inégalité de répartition des fragments entre les classes. Le nombre de fragments est inversement proportionnel à la classe de taille considérée : la fragmentation se caractérise par un très grand nombre de petits fragments (]1-2mm]), un nombre plus réduit de fragments]2-4mm] et un petit nombre de fragments >4mm.

Toutes espèces confondues, le nombre moyen de fragments par classe de taille est de 111 dans la classe]1-2mm] , 51 dans la classe]2-4mm] , et seulement 19 fragments supérieurs à 4mm (fig. 7b).

Nous avons vu précédemment que la variabilité de la fragmentation totale (toutes tailles de fragments confondues) est largement dépendante de l'essence. La variabilité spécifique est également importante au sein de chaque classe de taille. Le nombre de fragments oscille selon les espèces entre 16 et 304 dans la classe]1-2mm], 11 à 121 dans la classe]2-4mm] et 5 à 62 dans la classe >4mm (fig. 11). La variance des 3 séries est donc assez forte et le coefficient de variation se situe autour de 40% pour les trois classes de taille.

Il est nécessaire d'analyser l'effet de la variable « essence » au sein de chaque classe de taille de fragments.

- *Variabilité interspécifique par classe de taille*

Dans les trois classes de taille considérées, le test de Kruskal-Wallis indique que les échantillons proviennent de populations différentes (annexe II, fig. 5 à 8). Cependant, la variabilité spécifique au sein de chaque classe est différente. À première vue, il semble qu'elle soit très importante dans la classe]1-2mm]. La disposition des boîtes de dispersion est très étagée (fig. 11a). *Populus tremula* est l'espèce qui se fragmente le moins avec un nombre minimal de 16 fragments et *Fraxinus excelsior* celle qui se fragmente le plus avec un nombre maximal de 304 fragments. La variabilité décroît dans la classe]2-4mm]. L'écart entre les essences se réduit légèrement. *Fraxinus* n'est plus l'espèce qui se fragmente le plus et *Quercus* présente une fragmentation plus importante que les autres essences (fig. 11b) avec un nombre maximal de 121 fragments. *Populus* est toujours le taxon le moins fragmenté (de 11 à 70 fragments). Dans la classe >4mm, les boîtes de dispersion ont une répartition quasi linéaire à l'exception de *Quercus*, qui se détache largement du reste des essences ; la variabilité est globalement bien moins importante (fig. 11c).

Des comparaisons multiples par paires ont permis de mettre en évidence, pour chaque classe de taille, des groupes d'essences dont le nombre de fragments est proche (fig. 12).

Pour la classe]1-2mm], quatre groupes significativement différents sont mis en évidence.

Les extrêmes inférieurs et supérieurs sont respectivement constitués d'une essence isolée, *Populus*, et d'un ensemble regroupant *Corylus*, *Quercus*, *Carpinus* et *Fraxinus* qui donne en moyenne plus de fragments. *Fagus* présente des affinités avec *Populus*, tandis que *Betula* se rapproche du groupe supérieur. Au centre, *Acer* et *Pinus sylvestris* constituent un groupe

médian, tandis que *Pinus pinaster* se situe à la jonction entre ce groupe médian et l'ensemble inférieur.

Dans la classe]2-4mm], il n'y a plus que 2 essences isolées des autres : *Populus* qui produit en moyenne moins de fragments et *Quercus*, qui produit en moyenne beaucoup plus de fragments. S'agissant des autres essences, *Betula*, *Fagus*, *Carpinus* et *Corylus* ont une tendance basse alors que *Fraxinus*, *Pinus Sylvestris*, *Pinus pinaster* et *Acer* ont une tendance haute. *Quercus* et ces quatre dernières essences présentent une forte variabilité (cf. fig. 11b). *Betula* présente également des différences significatives avec l'ensemble des espèces du groupe à fragmentation haute (fig. 12).

Dans la classe >4mm, les disparités sont beaucoup moins importantes. Le test ne fait apparaître que trois groupes statistiquement différents. Cependant, si l'on se reporte au graphique des boîtes de dispersion, il semble que la différence la plus significative à considérer concerne uniquement *Quercus*.

La correction du niveau de significativité de Bonferroni (annexe II, fig. 8) confirme que seul *Quercus* diffère de toutes les autres essences en produisant en moyenne davantage de fragments. Deux autres paires se différencient statistiquement, il s'agit de *Pinus pinaster* qui se distingue de *Populus* et *Betula*.

Les différences entre taxons sont donc très faibles dans la classe >4mm et relativement faibles dans la classe]2-4mm]. Elles s'expriment essentiellement dans la classe]1-2mm].

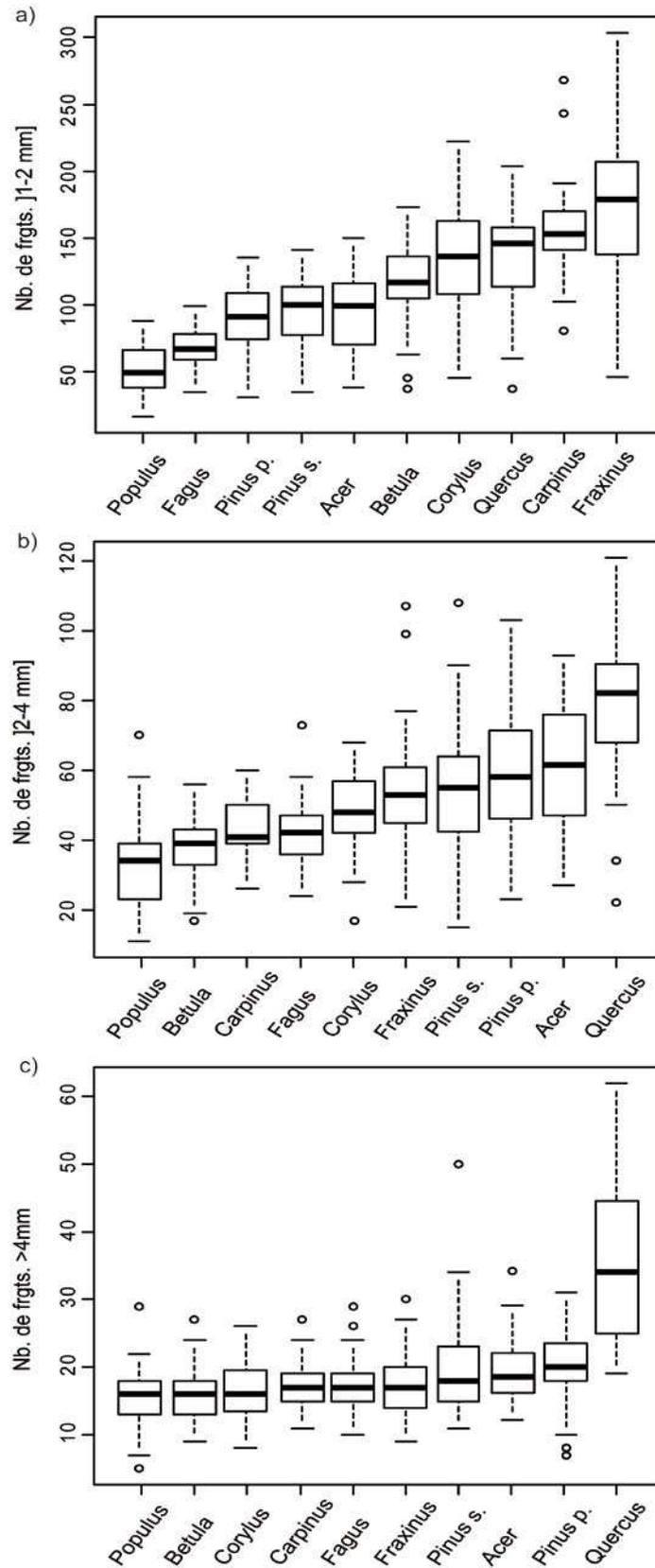


Figure 11 : Dispersion du nombre de fragments par classe de taille pour chaque taxon

]1 – 2mm]		]2 – 4mm]				> 4mm		
ESPECES	Groupes	ESPECES	Groupes			ESPECES	Groupes	
<i>Populus</i>	A	<i>Populus</i>	A			<i>Populus</i>	A	
<i>Fagus</i>	A B	<i>Betula</i>	A	B		<i>Betula</i>	A	
<i>Pinus p.</i>	A B C	<i>Fagus</i>	A	B	C	<i>Corylus</i>	A	B
<i>Acer</i>	B C	<i>Carpinus</i>	A	B	C	D	A	B
<i>Pinus s.</i>	B C	<i>Corylus</i>		B	C	D	A	B
<i>Betula</i>	C D	<i>Fraxinus</i>			C	D	A	B
<i>Corylus</i>	D	<i>Pinus p.</i>			C	D	A	B
<i>Quercus</i>	D	<i>Pinus s.</i>			C	D	A	B
<i>Carpinus</i>	D	<i>Acer</i>				D	E	
<i>Fraxinus</i>	D	<i>Quercus</i>					E	

Figure 12 : Différence de fragmentation par taxon dans les trois classes de taille de fragments selon la procédure de comparaison multiple par paires (procédure de Dunn, test bilatéral)

II.2.3.3. Liens entre propriétés mécaniques et fragmentation

- *Le nombre total de fragments*

Une série de tests de Spearman (annexe II, fig. 9) nous ont permis d'évaluer la relation existant entre les diverses valeurs décrivant les propriétés mécaniques des charbons de bois et le nombre total de fragments issus de la compression. Il apparaît qu'il n'existe quasiment aucun lien entre les propriétés mécaniques et le processus de fragmentation considéré dans sa globalité. La perte de masse, la perte de résistance à la rupture et la contrainte ne sont pas corrélées au nombre total de fragments produits. Le Module d'écrasement est très légèrement corrélé au nombre total de fragments : la p-value est significative (0.0076), mais le coefficient de détermination est faible ($\rho = 0.15$).

Les propriétés mécaniques comme la fragmentation sont fortement corrélées à l'essence, mais les deux séries de facteurs ne sont pas corrélés entre eux. Chaque essence résiste plus ou moins bien à la compression mais une fois que le processus de fragmentation est amorcé, il affecte les essences indépendamment de la contrainte supportée. **La résistance à la pression est une fonction de l'essence mais l'intensité de la fragmentation n'est pas corrélée à la résistance du matériau lui-même.**

II.3. Analyse et interprétation

II.3.1. Synthèse des résultats

- ✓ Nos résultats font apparaitre un **comportement différentiel des essences testées au regard de la résistance à la compression et de la fragmentation, deux processus qui ne sont pas corrélés.**
- ✓ **L'augmentation de la température induit globalement la diminution de la résistance** du matériau quelle que soit l'espèce (Fig. 4a, 4c, 4e). Cela est similaire au résultat des essais réalisés par ailleurs à basses températures sur des bois industriels (Gündüz *et al.*, 2008 ; Korkut *et al.*, 2008 ; Korkut et Hiziroglu, 2009 ; Kocafe *et al.*, 2010 ; Majano-Majano *et al.*, 2012). La perte de résistance est particulièrement visible au-delà de 500°C.
- ✓ La **perte de masse volumique est corrélée à la température de carbonisation mais également au taxon.** Toutefois la carbonisation tend à atténuer les différences de masse volumique entre espèces (Fig.3).
- ✓ La **perte de masse volumique induit une perte de résistance à la rupture** et explique l'essentiel des propriétés mécaniques des charbons de bois.
- ✓ Toutes températures confondues, **la résistance du matériau est aussi une fonction de l'espèce** (Fig. 4b, 4d, 4f). Les propriétés mécaniques des essences sont modifiées selon des seuils thermiques distincts (Fig. 5).
- ✓ La résistance à la pression est une fonction de l'essence mais **l'intensité de la fragmentation n'est pas corrélée à la résistance du matériau lui-même.** Les essences les plus fragiles ne sont pas celles qui se fragmentent le plus.

- ✓ La relation entre le nombre de fragments produits par la compression et la température n'est pas monotone. (Fig. 7a).
- ✓ Le nombre total de fragments après compression dépend principalement de l'essence quelle que soit la température considérée. *Populus* se fragmente peu et *Quercus* et *Fraxinus* produisent beaucoup de fragments. Entre ces deux extrêmes, *Fagus*, *P. pinaster*, *Acer* et *Betula* ont plutôt une tendance basse, tandis que *Corylus* et *Carpinus* ont une tendance haute. *P. sylvestris* a un comportement médian (Fig. 8, 9, 10).
- ✓ Toutefois, la variabilité interspécifique est principalement importante si l'on considère les petits fragments [1-2 mm], elle l'est moins dans la maille [2-4 mm]. Dans la dernière classe de taille (>4mm), seul *Quercus* se différencie de toutes les autres essences en produisant beaucoup plus de fragments (Fig. 11).

II.3.2. Caractéristiques spécifiques et comportement mécanique : analyse multifactorielle

Nos résultats font apparaître un comportement différentiel des essences testées au regard de la résistance à la compression et de la fragmentation, deux processus qui ne sont pas corrélés. Afin de déterminer si certaines caractéristiques physiques et anatomiques expliquent nos résultats, nous avons réalisé une analyse des correspondances multiples intégrant les paramètres enregistrés, calculés et mesurés propres aux taxons testés, ainsi qu'une série de caractéristiques anatomiques potentiellement incidentes⁵.

⁵ Nous n'avons conservé ici que les variables (définies par deux à trois modalités : haut / moyen / bas) ayant une incidence forte sur l'analyse. Les variables « épaisseur des fibres » et « porosité globale de l'échantillon » initialement testées, ont par exemple été retirées. Par ailleurs, les essences elles-mêmes sont intégrées en tant que variables supplémentaires et ne participent pas au calcul de l'ACM.

Graphique d'ACM

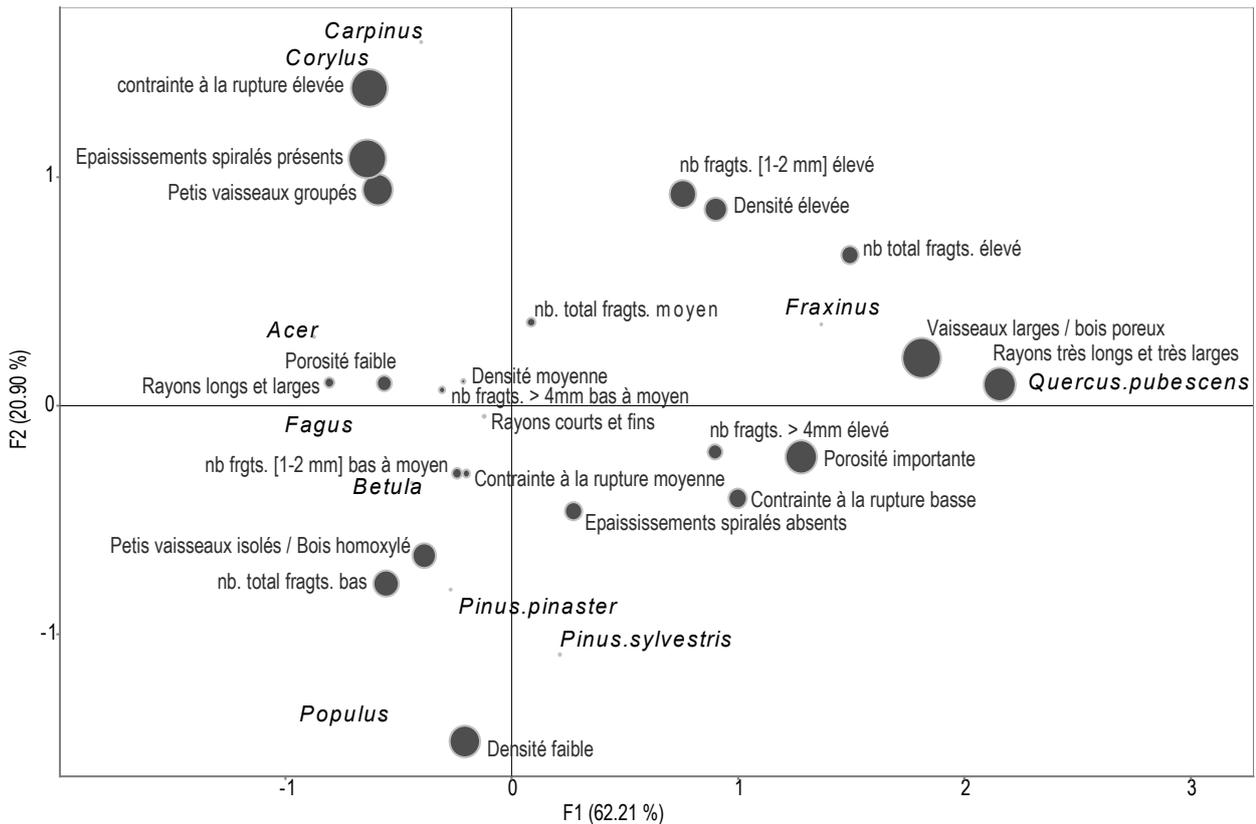


Figure 13 : Graphique d'analyse des correspondances multiples intégrant les données de la fragmentation, les propriétés mécaniques des essences ainsi que leurs caractéristiques anatomiques.

Les résultats de l'analyse des correspondances multiples ainsi que la matrice des corrélations mettent en évidence des liens importants entre certains paramètres du modèle (fig. 13).

Sur l'axe 1 : les modalités « gros vaisseaux », « rayons très longs et très larges » et « porosité importante » sont étroitement corrélées. Associées de manière secondaire à l'absence d'épaississements spiralés, ces modalités sont liées à un seuil d'élasticité faible et un nombre important de fragments supérieurs à 4 mm.

Sur l'axe 2 : dans la partie supérieure droite du graphique, en lien avec les variables actives sur l'axe 1, la « masse volumique élevée » est fortement corrélée à des valeurs élevées du nombre total de fragments et du taux de fragments >1mm.

Dans la partie supérieure gauche, le seuil d'élasticité élevé est étroitement lié à la présence d'épaississements spiralés et, de manière secondaire, à la modalité « petits vaisseaux groupés ».

Enfin, dans la partie inférieure du graphique, la corrélation « masse volumique basse » et « petits vaisseaux isolés ou bois homoxylé » est liée au faible nombre total de fragments.

II.3.3. Interprétation

II.3.3.1. Facteurs incidents sur la fragmentation

- *Porosité vs. homogénéité du bois*

L'intensité de la fragmentation est liée à l'importance de la porosité du charbon. Les bois présentant une zone poreuse bien marquée, avec de gros vaisseaux, tels *Quercus* et *Fraxinus*, sont ceux qui produisent le plus de fragments. *Carpinus* et *Corylus* présentent une zone poreuse bien moins marquée, mais la disposition des vaisseaux en longues files radiales, favorisent leur fragmentation.

Inversement, les bois homogènes (petits vaisseaux isolés diffus ou bois homoxylés) tels *Populus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Acer* ou *Betula* sont ceux qui produisent le moins de fragments.

- *Longueur et largeur des rayons*

La production de gros fragments, dont nous avons vu qu'elle concerne uniquement *Quercus*, est aussi liée à la présence d'une importante zone poreuse. Mais *Quercus* diffère des autres essences par la présence des rayons multisériés, de loin les plus longs et larges du corpus testé. Ceux-ci créent des zones de fragilité supplémentaires après la combustion qui expliquent le mode de fragmentation particulier de cette essence.

Dans le cas des autres essences, les rayons, qu'ils soient plurisériés ou unisériés, jouent un rôle très secondaire tant sur la fragmentation que sur les propriétés mécaniques (*cf.* position centrale et faible contribution dans la construction du graphique d'ACM).

II.3.3.2. Facteurs incidents sur le seuil d'élasticité

Corylus, *Carpinus* et *Acer* présentent un seuil d'élasticité plus élevé que les autres taxons. Cette caractéristique est à mettre en lien avec la présence d'épaississements spiralés, dont la fonction de soutien est visiblement en partie conservée après la

carbonisation. Inversement, la faiblesse du seuil d'élasticité est liée soit à la porosité du charbon dans le cas de *Fraxinus* et *Quercus*, soit à sa faible densité dans le cas de *Populus*, *Pinus sylvestris* et *Pinus pinaster*.

II.3.3.3. À propos de la masse volumique

Si les charbons peu denses ont un seuil d'élasticité bas, les charbons denses en revanche présentent un seuil d'élasticité très haut ou très bas. La relation masse volumique / seuil d'élasticité n'est donc pas linéaire. Dans le cas des charbons denses, certaines caractéristiques anatomiques héritées du bois (porosité, présence de rayons multisériés / présence d'épaississements spiralés) prennent le pas sur la masse volumique et conditionnent davantage la résistance du matériau.

La masse volumique semble avoir une incidence sur la fragmentation : les charbons denses se fragmentent beaucoup, les charbons de densité faible ou moyenne ont une fragmentation faible à moyenne. La régression des variables « masse volumique » et « nombre total de fragments » (les deux séries à 500°C suivent la loi normale) confirme qu'il existe entre elles une relation linéaire (p-value significative). Le R^2 est cependant relativement bas (0.266) et la densité n'est pas, nous l'avons vu, l'unique critère influençant la fragmentation.

II.3.3.4. Le cas particulier de *Fagus*

Au regard des liens mis en évidence entre caractéristiques physiques/anatomiques et fragmentation, le cas de *Fagus* est difficilement interprétable.

En effet, cette essence présente une masse volumique élevée, de nombreux vaisseaux composant le plus souvent une zone poreuse bien visible et possède des rayons qui, pour être moins longs et larges que ceux de *Quercus*, sont plus importants que ceux de toutes les autres essences. Malgré cela, son seuil d'élasticité est moyen et, dans toutes les classes de taille, il fait partie des espèces qui se fragmentent le moins. Il se rapproche fortement de *Populus*. Sa faible fragmentation explique d'ailleurs en partie son positionnement sur le graphique d'ACM. Le comportement à la compression de cette essence n'est donc pas

expliqué par les critères pris en compte dans notre analyse. Son comportement thermique semble également différer légèrement du reste des taxons. D'autres propriétés physiques (composants chimiques ?) doivent avoir une influence sur son comportement thermomécanique qu'il importera de déterminer lors d'études ultérieures.

Conclusion du chapitre III : de l'expérimentation au contexte archéologique

Cette étude montre que la structure anatomique du bois des différents taxons testés a une incidence importante sur les propriétés mécaniques des charbons qui en sont issus. La carbonisation, si elle produit sans doute un matériau moins hétérogène que ne le sont initialement les différents bois, ne gomme pas les différences de densité, d'organisation et de composition cellulaire, etc.

Le comportement thermique, la résistance à la pression, la fragmentation et ses modalités sont largement dépendantes des caractéristiques physiques et anatomiques des essences.

Certaines des différences notées sont importantes à considérer du point de vue archéologique. L'altération des propriétés mécaniques suit un gradient thermique différentiel selon l'essence qui peut engendrer des différences de fragmentation des taxons au sein d'un même foyer. La température de formation du charbon de bois influence également la fragmentation du matériau (Théry *et al.*, à paraître). Or, les températures atteintes au sein d'une structure de combustion varient dans la durée mais aussi à l'intérieur même de la structure. La question de la fragilité des charbons de bois, en lien avec leur température de formation est donc archéologiquement très difficile à appréhender.

Les différences de fragmentations sont principalement visibles en dehors de la classe]>4mm]. Ces premiers résultats tendent donc à montrer qu'une anthraco-analyse portant sur les seuls charbons supérieurs à 4mm induirait (comparativement aux classes de taille inférieures) moins de risques de sous- ou surreprésentations des taxons à l'exception de *Quercus* qui est surreprésenté dans cette classe.

Nous avons également noté une variation taxonomique des valeurs de la contrainte à la rupture. En termes archéologiques, cela signifie que la rupture du matériau n'est pas initiée sous les mêmes niveaux de pression. Ainsi, à conditions d'enfouissement égales, les taxons n'auront pas forcément la même capacité de résistance, ce qui pourrait être un facteur de biais. Cependant, la contrainte à la rupture dépend de la température de formation du charbon de bois et n'a pas d'incidence sur la quantité de fragments produits après la rupture du matériau. Il en résulte donc un ensemble de situations extrêmement variables, dont tous les paramètres ne sont ni connus, ni mesurables. Aussi, s'il est important d'étudier et de prendre en compte les conditions d'enfouissement (nature et intensité des processus post-

dépositionnels ayant participé à la formation du dépôt, vitesse d'enfouissement, à l'échelle du site, mais aussi des variations intra-site), il n'est pas possible en l'état d'inférer le comportement mécanique des charbons. Il faut néanmoins garder en tête au moment de l'interprétation, que certains taxons sont plus fragiles que d'autres.

Inversement, les valeurs obtenues pour la contrainte à la rupture (oscillant de 8 à 19.4 MPa pour une moyenne de 13.9 MPa) apportent des précisions significatives. En effet, la pression supportée par les charbons de bois avant fragmentation est relativement élevée. Mécaniquement, le charbon de bois est un matériau considéré comme fragile. Or à titre de comparaison, la contrainte à la rupture d'un béton ordinaire se situe entre 16 et 40MPa, celui de l'acier entre 235 et 350MPa et celui des résineux courants, entre 18 et 30MPa. Or, pour l'essentiel les processus post-dépositionnels ne génèrent pas des pressions très importantes. La pression exercée par un pas d'homme par exemple (dépendant du poids de la personne et de la surface de son pied reposant au sol) est proche de 1MPa. De même, la pression maximale mesurée lors d'expérimentations de propagation du gel dans une entaille de roche calcaire est de l'ordre de 6MPa (Bost, 2008).

Ainsi, l'intense fragmentation des charbons de bois (allant parfois jusqu'à la disparition de la fraction macroscopique du matériel) caractéristique d'une partie des sites pléistocènes (du sud-ouest français notamment) ne semble pas pouvoir être le fait de processus uniques, ni de courte durée. Les processus classiques type gel-dégel ou piétinement, répétés de manière inhabituelle au cours d'une phase de faible (voir d'absence) sédimentation, pourraient sans doute générer une fragilisation progressive du matériel, conduisant à la fragmentation extrême que l'on connaît. De tels effets doivent *a priori* être interprétés comme le signe de conditions particulières.

Bien sûr, ces observations doivent être nuancées, notamment du fait du mode de fabrication des échantillons relativement éloigné des réalités archéologiques. Ces résultats viennent cependant documenter le comportement mécanique des charbons de bois, encore largement méconnu.

De manière à tester le comportement des charbons de bois dans des situations plus proches des conditions archéologiques réelles, nous avons mis en œuvre une série d'expérimentations permettant d'appréhender les effets particuliers des alternances de gel-dégel et de retrait-gonflement du sédiment sur les charbons de bois, leur piétinement, leur

exposition aux phénomènes de météorisation. Les résultats sont présentés dans les chapitres qui suivent.

CHAPITRE IV
CHARBONS DE BOIS ET PHÉNOMÈNES PÉRIGLACIAIRES, APPROCHE
EXPÉRIMENTALE

Introduction

- *Qu'est-ce que le périglaciaire ?*

Le terme périglaciaire désigne tous les processus géomorphologiques associés aux alternances de gel-dégel de l'eau contenue dans les sols ou dans les roches. Les régions périglaciaires sont donc celles dont le modelé est tributaire du gel du sol, même lorsque celui-ci n'est pas permanent. Sols structurés (sols striés ou polygonaux), blocs laboureux, coulées de solifluxion, cryoturbation, etc., sont des marqueurs de processus générés par l'alternance des cycles de gel et de dégel du sol. De tels marqueurs peuvent être le fruit de processus actifs sous les hautes latitudes et altitudes, ou inactifs. On parle alors de formes héritées. Sous nos latitudes, le domaine périglaciaire actif se limite aux régions montagnardes. L'étage périglaciaire se situe théoriquement entre l'isotherme 0°C et le bas de l'étage glaciaire. Ses limites altitudinales sont variables d'une chaîne à l'autre. Dans les Pyrénées centrales, les formes périglaciaires se développent à partir de 2250-2300m d'altitude (Feuillet et Sellier, 2008). Dans les Alpes du Briançonnais, l'étage périglaciaire débute vers 2500m (Francou, 1983).

Toutefois, la température n'est pas le seul déterminant de l'activité périglaciaire et de son intensité. L'ensoleillement, le vent, l'humidité, l'amplitude thermique été/hiver, la lithologie, influencent l'ampleur des effets des alternances gel-dégel. Mais c'est surtout la durée et la continuité du couvert neigeux qui conditionnent le régime thermique des sols de montagne. En dehors de la période nivale, la température du sol est fortement corrélée à celle de l'air et subit donc des variations importantes. Inversement, pendant la période nivale, la couverture neigeuse joue un rôle d'isolant thermique. L'effet isolant de la neige dépend principalement de l'épaisseur de la couche (Liboutry, 1965 ; Goodrich, 1982). Dans les Pyrénées, sur le site des Lacs d'Ardiden (2450m), les températures quotidiennes moyennes de l'air enregistrées par Météo France entre 2007 et 2009 oscillent entre -16 et 19.2°C. La température minimale atteinte est de -20.4°C. Ces températures font apparaître 111 cycles gel-dégel par an, mais seuls 18 cycles ont lieu en dehors de la période nivale (Feuillet, 2010). Cela signifie que seuls 16% des cycles concernent directement le sol. Dans la Haute Ubaye entre 2450 et 3150m d'altitude à la Mortice et au Chambeyron, les enregistrements réalisés

entre 1975 et 1982 font apparaître seulement 20 à 25 cycles annuels en moyenne à 5cm de profondeur (Coutard *et al.*, 1996). De même, sur le site expérimental du Parc d'Ordesa y Monte Perdido (Pyrénées espagnoles), le nombre de cycles gel-dégel moyen par an oscille entre 25 et 50 en surface et 6 à 20 à une profondeur de 10cm (le régime thermique du site est détaillé au § 1.3 de ce chapitre).

Si le nombre de cycles peut paraître relativement réduit, les phénomènes de cryoclastie, d'éboulis, de cryoexpulsion, les coulées de solifluxion, la formation de sols polygonaux et de sols striés, n'en conditionnent pas moins la morphogénèse locale.

Les stigmates de tels processus sont visibles dans les séquences des sites archéologiques pléistocènes, dont les dépôts se sont formés lors d'épisodes climatiques extrêmement rigoureux, ou qui ont subi *a posteriori* les effets de gels profonds.

- *Régime thermique et extension du pergélisol au cours du dernier cycle glaciaire en Europe occidentale*

Le dernier cycle climatique en Europe est relativement bien connu. Les données issues des carottages dans la calotte glaciaire et des longues séquences lacustres et marines, associées aux résultats des nombreuses analyses géomorphologiques et paléoenvironnementales ont permis en quelques décennies de fixer avec beaucoup de précision le cadre climatique terrestre global et les expressions continentales de ses variations. Le croisement de données diverses et multi-scalaires conduit aujourd'hui à la formulation de modèles d'évolution du régime thermique continental et d'extension du permafrost. Cependant, malgré l'abondance et la qualité des données paléoclimatiques et paléoenvironnementales, de nombreuses incertitudes persistent. À la complexité des mécanismes climatiques, répondent des modifications thermiques et environnementales régionales influencées par de nombreux paramètres. Un rapide bilan (non-exhaustif) des données de la littérature montre que les gradients altitudinaux, latitudinaux, mais aussi longitudinaux contribuent à créer un ensemble de situations relativement hétérogènes en Europe de l'Ouest, qui rendent dès lors, les extrapolations à l'échelle locale extrêmement difficiles.

Le dernier cycle glaciaire débute avec le stade isotopique 5e, lors du dernier interglaciaire Eémien, vers 130ka. Il se caractérise par une dynamique forestière homogène en Europe et des températures moyennes annuelles de 2° à 4°C supérieures à l'actuel. D'après Zagwin (1996), les températures pendant les mois les plus froids oscilleraient entre -4 et 4°C, et celles des mois les plus chauds entre 10 et 20°C.

Le Début-Glaciaire ou Weichselien ancien est marqué par la chute des températures et l'augmentation de la continentalité. Pendant le stade de Melisey I (OIS 5d), celles-ci sont estimées à -2°C à la Grande Pile et -4°C en Velay ; elles seraient encore inférieures durant le second stade de Melisey (OIS 5b). Les deux interstades de Saint Germain (OIS 5c et 5a) sont caractérisés au contraire par des températures élevées, sans toutefois atteindre les niveaux de l'optimum Eémien (Guiter *et al.*, 2003).

Le dernier Pléniglaciaire, et notamment les OIS 4 et 2, est caractérisé par l'installation du permafrost en Europe du Nord. D'après Vandenberghe (1998), les températures moyennes des mois les plus chauds en Europe du Nord-Ouest atteindraient 10°C, quand celles des mois les plus froids pourraient être inférieures à -20°C. Le Pléniglaciaire ancien est également caractérisé par une variation importante de l'humidité. L'OIS 3, même s'il est moins rigoureux reste globalement froid avec des températures qui oscilleraient entre 10 et 15°C en été et -4 à -20°C en hiver selon les auteurs. Les réchauffements interstadias atteindraient cependant des températures proches de l'actuel. Le permafrost referait son apparition au cours de l'OIS 2, vers 28 000 ans (Van Vliet-Lanoë, 1989). Le Maximum glaciaire est atteint vers 20 000BP (Jouzel, 1999) avec des températures moyennes annuelles inférieures à -7°C (Guiter, 2003) et des températures estivales ne dépassant pas les 7 ou 8°C (Vandenbergue, 1992). L'Europe du Sud tout en étant confrontée à des conditions moins extrêmes, enregistre de profondes variations climatiques et environnementales pendant les oscillations du Pléniglaciaire. Les travaux récents dans le bassin méditerranéen montrent notamment que même les courts événements de Heinrich entraînent de profondes modifications de la végétation. L'événement de Heinrich 2 qui précède le Maximum Glaciaire est documenté dans les séquences du Golfe du Lion et de la mer d'Alboran. Les reconstitutions thermiques indiquent pour l'Ouest méditerranéen des températures moyennes annuelles de -10 à -15°C entre 25 et 23500 ka calBP. Les estimations au cours du Maximum Glaciaire sont plus élevées, avec des températures hivernales de -10 à -15°C dans

la mer d'Alboran et de $-16\pm 8^{\circ}\text{C}$ dans le Golfe du Lion et des températures moyennes annuelles positives (Beaudouin, 2005, 2007 ; Combourieu Nebout *et al.*, 2009 ; Fletcher et Sanchez-Goñi, 2008). Les modélisations réalisées par Tjeerd Van Andel (2002), montrent qu'en plus du gradient Nord-Sud prévisible, il existe un fort gradient Est-Ouest, les conditions thermiques se durcissant avec l'augmentation de la continentalité. Les températures dans le sud-est de la France oscilleraient en été entre 12 et 18°C et en hiver entre -4 et 0°C au cours du Maximum Glaciaire. L'événement de Heinrich 1 est ensuite particulièrement marqué dans toutes les séquences de l'ouest méditerranéen. Il est caractérisé par des conditions très froides et surtout très sèches par rapport au Maximum Glaciaire (températures minimales en hiver -20°C et -8°C en été). Dans le sud de l'Italie, les variations enregistrées au Lago Grande Di Monticchio, permettent d'estimer de manière très générale durant le Pléniglaciaire des températures hivernales comprises entre -10 et 0°C au cours des interstades et inférieures à -10°C lors des stades glaciaires (Allen *et al.*, 2000).

Ainsi, bien qu'étant atténué, l'abaissement drastique des températures atteint jusqu'aux régions méridionales de l'Europe. La question de l'extension géographique du permafrost pendant le Pléniglaciaire doit alors être considérée avec attention. Le permafrost, ou pergélisol, est défini par le gel permanent d'un sol pendant au minimum deux années consécutives (French, 2007). Plusieurs types, dont la mise en place dépend des conditions thermiques, sont toutefois distingués. Le pergélisol continu implique des températures moyennes annuelles de l'air (TMAA) $\leq -8^{\circ}\text{C}$ avec une température du mois le plus froid $\leq -20^{\circ}\text{C}$, le domaine du pergélisol discontinu se développe à partir d'une TMAA $\leq -4^{\circ}\text{C}$ et le domaine du pergélisol sporadique implique une TMAA inférieure à 0°C (Vandenberghe et Pissart, 1993 ; Levavasseur *et al.*, 2011). La question de l'extension du permafrost en Europe, et plus particulièrement en France, est toujours en débat. Une partie des auteurs considèrent que seule la moitié nord de la France a été touchée par un pergélisol continu, tandis que des données plus anciennes font état d'une extension qui aurait touché tout le pays. La carte publiée sur le site du CNRS (Cartographie ANDRA-CNF-INQUA 1999, Lettre n°10 du Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le climat) issue des travaux de Van Vliet-Lanoë et Hallégouët (2001) montre une extension du pergélisol continu lors du Maximum glaciaire sur tout le

Nord et l'Est du pays jusqu'au nord du Languedoc avec quelques îlots à l'ouest et au sud-est du Massif Armoricaïn. L'Ouest et le Sud du pays, en revanche, ne seraient concernés que par un pergélisol discontinu ou un simple gel saisonnier profond. Pourtant, les indices d'emprise du pergélisol dans la région Sud-ouest sont nombreux (Bastin et Cailleux, 1941 ; Tricart, 1956 ; Texier et Bertran, 1993 ; Gangloff *et al.*, 1994 ; Texier, 1996 ; Bertran et Fabre, 2005 ; Bertran *et al.*, 2009b) et des données récemment acquises en Aquitaine contribuent à réactualiser la question (Lenoble *et al.*, 2012). D'anciennes publications font état dans le Sud-Est de la France de la présence de réseaux de polygones et de sols cryoturbés (Bouteyre et Allemann, 1964 ; Cailleux et Rousset, 1968 ; Arnal, 1971 a et b ; Nury, 1969). De même, les modélisations de M. Garcin (1994) pour la Péninsule Ibérique montrent la sensibilité de l'intérieur des terres aux divers coups de froid du dernier cycle climatique pouvant entraîner des températures moyennes annuelles proches ou inférieures à 0°C. D'après cet auteur, l'installation d'un permafrost de type sporadique, discontinu ou continu est envisageable. Il pourrait concerner des surfaces non négligeables et « constituer un phénomène important de l'histoire quaternaire de l'Espagne, en dépit de sa position géographique méridionale ».

- *Gel du sol et conservation des charbons de bois*

On le voit, la question de l'extension du permafrost en Europe Occidentale est loin d'être réglée. Pour nous, elle revêt une importance particulière puisque l'intensité des phénomènes glaciaires et périglaciaires pourrait être un des facteurs agissant sur la conservation des charbons de bois. Dans la région aquitaine, les données récemment acquises font état d'au moins trois épisodes de mise en place d'un pergélisol au cours des derniers 40 000 ans, lesquels semblent particulièrement bien corrélés aux événements de Heinrich (Bertran et Lenoble, 2012). Certains de ces épisodes d'extension du pergélisol sont identifiés et datés dans les séquences locales de cavités. C'est le cas notamment du Pech de l'Azé II ou de la Grotte XVI dans lesquels les charbons de bois sont fort peu conservés. Dans d'autres gisements, tels la grotte Bouyssonie en Corrèze, la présence de petits sols polygonaux dans les niveaux du Paléolithique supérieur a été mise en évidence. Les couches archéologiques qu'ils renferment sont très riches en résidus de carbonisation et les charbons de bois sont nombreux et bien conservés. Le lien entre processus périglaciaires et

conservation du matériel anthracologique n'est donc ni unique, ni linéaire et demande à être approfondi, mais peut clairement être envisagé dans certaines séquences. L'intensité des phénomènes en jeu semble toutefois être un facteur important de l'ampleur de la dégradation du matériel.

Or, un certain nombre de variables participent de l'intensité de l'expression des phénomènes périglaciaires.

La propagation des ondes de gel est évidemment dépendante de l'intensité du gel, donc de la température de l'air, mais le couvert nival et le couvert végétal, l'hygrométrie du sol, ses propriétés, le niveau de radiation solaire participent également de l'importance de l'activité cryogénique. La pénétration des ondes de gel dans le sol dépend notamment de la notion de conductivité thermique. Celle-ci est influencée par l'intensité du froid, mais aussi par la nature du sol (minéralogie et densité) et sa teneur en eau. La conductivité thermique est plus importante dans un sol minéral que dans un sol riche en matière organique, elle a également tendance à augmenter avec la densité. L'eau possède une meilleure conductivité thermique que l'air, aussi à matrice, densité et porosité égales, la conductivité du sol augmente avec la teneur en eau. Les matériaux fins sont généralement plus conducteurs que les matériaux grossiers, mais la porosité en présence d'eau sera facteur d'augmentation des transferts d'énergie thermique. La variabilité de l'expression des processus liés au gel dépend donc d'une série de facteurs qui contribuent à créer des situations archéologiques hétérogènes.

Le lien entre processus périglaciaires et conservation des charbons de bois avait été envisagé par Théry-Parisot (1998, 2001) et l'avait conduite à mettre en œuvre une série d'expérimentations (cf. chapitre I, § II.4.). Les résultats ont démontré la relative sensibilité des charbons de bois aux alternances gel-dégel, en particulier lorsque ceux-ci sont issus de bois altéré et en présence d'eau. Dans ces premières expériences, les pressions externes dues au changement de volume de l'eau avaient probablement une incidence secondaire – bien qu'effective – sur la fragmentation des charbons de bois par rapport à l'impact des pressions internes liées au gel de l'eau à l'intérieur des fragments. Les effets induits semblaient alors assez réduits sur les charbons issus de bois sains et plusieurs centaines de cycles étaient nécessaires pour que les premiers signes de fragmentation apparaissent. Il

n'existe pas à l'heure actuelle de données permettant de documenter l'impact conjoint des pressions internes et externes telles qu'elles se produisent en contexte archéologique au sein d'une matrice sédimentaire. C'est-à-dire impliquant le gel de l'eau à l'intérieur des fragments eux-mêmes, mais aussi les phénomènes de compression et de traction induits par les gonflements et mouvements du sédiment lors des phases de gel et de dégel du sol. De même, l'éventuel comportement différentiel des taxons soumis à de telles pressions n'a été que très peu testé. Dans le cadre de deux nouvelles expériences, nous avons étudié **les variations taxonomiques** des effets du gel sur les charbons de bois. La première, en conditions naturelles dans un milieu périglaciaire actuel, permet d'apprécier l'incidence de plusieurs facteurs (alternances gel-dégel, solifluxion, vent, enfouissement, etc.) ; l'autre, en conditions contrôlées, permet de mesurer les seuls effets des alternances gel-dégel sur des charbons inclus dans une matrice sédimentaire limono-argileuse. Le détail des protocoles expérimentaux et des résultats obtenus sont présentés ci-après.

I. EXPÉRIMENTATION IN VIVO DANS LES PYRÉNÉES ESPAGNOLES

I.1. Le Programme « Gavarnie »

L'expérimentation présentée ici a été réalisée dans le cadre du « Programme Gavarnie » dirigé par Pascal Bertran de 2003 à 2008. Ce programme se situe dans la continuité du programme « Transit » mené dans les Alpes dans les années 90 (Texier *et al.*, 1998). Il a eu pour but de :

- documenter la dynamique sédimentaire dans les entrées de cavités karstiques en milieu périglaciaire (fonctionnement du système grotte-talus détritique : production détritique des parois, relation avec le régime thermique de la cavité, dynamique superficielle du talus)
- caractériser les mécanismes de dégradation des assemblages archéologiques en contexte de solifluxion (déformation spatiale des structures archéologiques, vitesse de déplacement, orientation et altération des objets)

Le programme a été financé par l'Action Collective de Recherche « Paléolithique moyen en Aquitaine septentrionale » dirigée par J.-P. Texier et J. Jaubert, le programme « Transitions » de la région Aquitaine porté par B. Maureille et J.-G. Bordes, ainsi que par l'INRAP dans le cadre de ses projets d'activité de Recherche.

I.1.1. Le site expérimental

La zone d'expérimentation est située dans le parc naturel d'Ordesa y Monte Perdido, sur le versant espagnol du massif du Taillon, à l'ouest du cirque de Gavarnie et de la Brèche de Roland. Le substratum du massif est constitué de grès d'âge crétacé et de calcaires éocènes. Le site expérimental, autour de 2750m d'altitude, est proche de l'isotherme 0 à -1°C de température moyenne annuelle de l'air, c'est-à-dire à la limite inférieure du désert périglaciaire d'altitude. La végétation y est rare et constituée de taches de pelouse. La lithologie est dominée par les calcaires avec un karst bien développé. Le versant sud du Taillon est aujourd'hui entièrement déglacé, et ce probablement depuis le Tardiglaciaire (Feuillet *et al.*, 2010). Le versant est recouvert de placages de till discontinus, remaniés par la solifluxion, toujours active actuellement. Les versants du site présentent une pente allant de 2° à 22° environ. Ils s'organisent sous forme de coulées à front pierreux caractéristiques d'un environnement périglaciaire et sont par ailleurs riches en petits sols structurés actifs (cercles de pierres, sols polygonaux).

Le site expérimental comprend une petite cavité, la « grotte du Névé » qui s'ouvre vers l'est à 2764 ± 6 m et plusieurs zones de dépôts sur le versant extérieur, au sud.

Plusieurs impératifs ont motivé le choix de ce site i) un contexte climatique périglaciaire, ii) la présence d'une cavité de taille modeste, mais compatible avec une occupation humaine, iii) des conditions d'accessibilité relativement aisées, tout en étant à l'écart des chemins de randonnées afin d'éviter aux maximum les perturbations d'origine humaine.

(Pour les détails du programme et des résultats voir notamment les rapports d'activité 2003, 2004, 2005, 2006 ; Sasias, 2006 ; Lenoble *et al.*, 2008, 2009 ; Bertran *et al.*, 2009 ; Caspar *et al.*, 2009 ; Mallye *et al.*, 2009 ; Claud et Bertran, 2010 ; Feuillet, 2010 ; Feuillet *et al.*, 2010)

I.1.2. Le régime thermique du site

I.1.2.1. Contexte général

Les Pyrénées correspondent à un domaine périglaciaire humide car soumis aux influences atlantiques. La zone d'expérimentation reçoit 1500mm à 2000mm de précipitations par an. La neige est abondante du début de l'automne à la fin du printemps et la température moyenne annuelle à une profondeur de 30cm est de 3 à 5°C, ce qui exclut la présence d'un pergélisol.

Afin de documenter précisément le régime thermique du site expérimental, plusieurs instruments enregistrant les conditions météorologiques ont été implantés entre 2003 et 2008.

I.1.2.2. Implantation des stations d'enregistrements thermiques

Quatre stations de mesure ont été installées autour de la butte qui domine la cavité. La première est localisée dans le talus extérieur à l'entrée de la grotte, en exposition est. La deuxième est située à l'intérieur de la cavité. Les deux autres sont situées sur les versants sud et ouest de la butte.

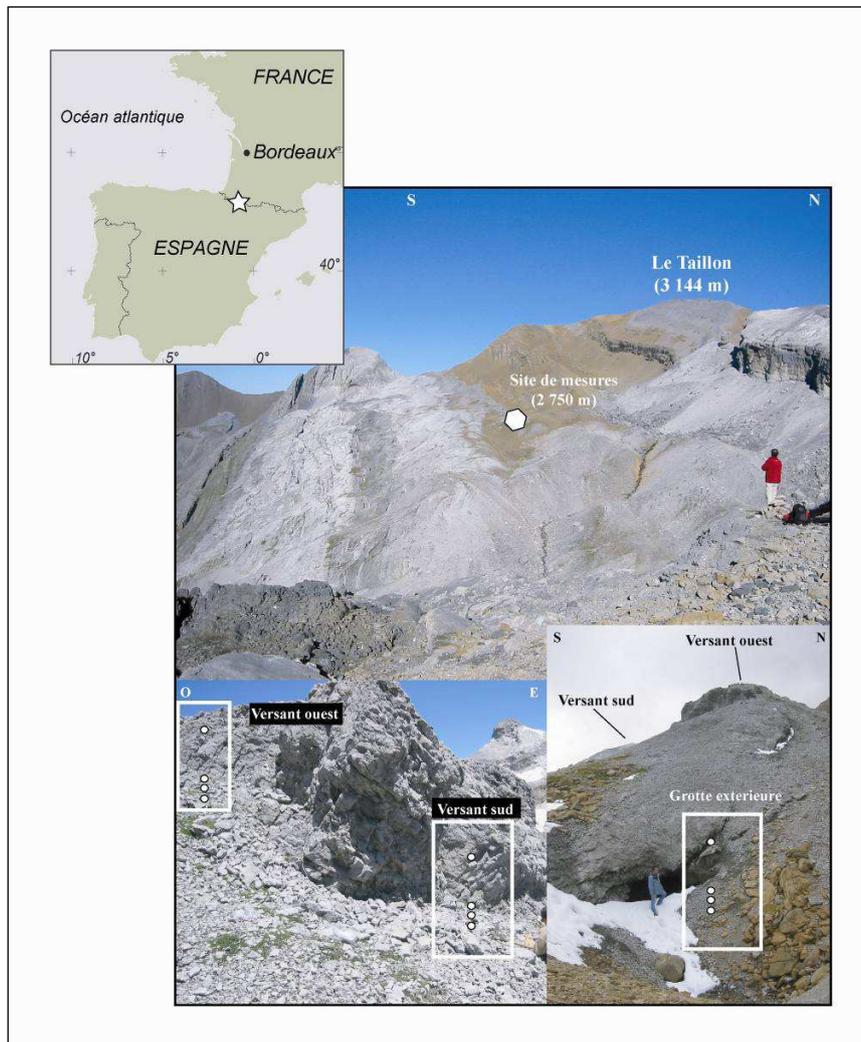


Figure 14 : Localisation du site expérimental et implantation des trois stations de mesure thermique extérieures ; la quatrième est située à l'intérieur de la cavité (In : Feuillet, 2010)

Chaque station dispose d'un enregistreur thermique à quatre sondes implantées à différentes profondeurs (fig. 14) :

- une sonde dans la paroi située à environ 1,5 m au-dessus du sol (sonde à 5 cm de profondeur dans la paroi)
- une sonde à la surface du sol (environ -1 cm)
- une sonde à -10 cm
- une sonde à -30 cm

Les enregistrements ont eu lieu toutes les huit heures (5h00, 13h00, 21h00).

Parallèlement, la profondeur maximale atteinte par le gel a été estimée par simulation numérique (logiciel Alizé-Icpc développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes).

I.1.2.3. Résultats

Les données des enregistrements thermiques ont principalement été analysées par Thierry Feuillet et Pascal Bertran. Les résultats sont présentés plus en détail dans la thèse de T. Feuillet (2010) ainsi que dans un rapport non publié (Feuillet *et al.*, 2010) et dans le numéro 118 des Nouvelles de l'Archéologie (Bertran *et al.*, 2009a). Nous n'exposons ici que les données indispensables à l'interprétation de nos propres résultats.

Sur la période 2004 – 2008, le nombre de cycles gel-dégel moyen par an oscille selon les sites entre 25 et 50 en surface, 6 à 20 à une profondeur de 10cm et seulement un seul cycle à 30cm de profondeur. La variabilité interannuelle et spatiale est forte et la comparaison entre les enregistrements obtenus à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité montre que le régime thermique au sein de la cavité et sur le talus extérieur est beaucoup moins rude que sur les versants qui entourent le site. Ce décalage s'explique par l'obturation de l'entrée de la cavité par une congère de neige entre novembre et juin qui isole la grotte des variations thermiques atmosphériques en hiver. En été, la chaleur en journée pénètre peu dans la cavité qui fonctionne comme un piège à froid. Par la conjonction de ces deux phénomènes, l'amplitude thermique annuelle au sein de la cavité est très atténuée et le nombre de cycles gel-dégel dans la cavité et sur le talus est globalement moins important que sur les versants, particulièrement si l'on considère les enregistrements effectués dans les parois (fig. 15). De même, si les températures moyennes annuelles les plus basses sont enregistrées sur le talus externe et à l'intérieur de la cavité (1.7 et 2.1°C respectivement au niveau du sol alors qu'elles sont supérieures à 2.5°C sur les versants), les températures minimales en revanche sont enregistrées sur les versants, en particulier sur le versant sud, plus rapidement déneigé et donc beaucoup plus soumis aux basses températures de l'air. Ce versant peut par ailleurs faire l'objet d'épisodes de fonte du couvert neigeux lors des radoucissements hivernaux. Dans ce cas, lorsque les températures atmosphériques s'abaissent à nouveau, l'onde de gel, en l'absence de neige, est beaucoup plus intense et peut pénétrer profondément dans le sol. Un tel phénomène s'est produit le 28 décembre 2005 : la température enregistrée à la surface du sol sur le versant sud est de -11.6°C, elle est de -7.4°C à 10cm de profondeur et de -5.8°C à 30cm de profondeur. C'est notamment à partir de ces données qu'a pu être simulé numériquement le déplacement du front de gel et sa profondeur maximale. Le gel, lors

d'épisodes exceptionnels comme celui-ci, atteindrait 1m de profondeur avec un décalage dans le temps de 69 jours, l'onde se déplaçant à une vitesse de 0.6mm/h.

Ainsi, outre la température atmosphérique (bien sûr liée à l'ensoleillement), la fréquence et l'intensité des cycles gel-dégel est étroitement corrélée à la durée et la continuité du manteau nival. À la surface du sol, les cycles ont principalement lieu en automne, avant l'arrivée du manteau nival continu (durant cette période, ils sont particulièrement nombreux en versant ouest, peu ensoleillé). Sous la neige, les cycles existent également, mais sont de faible intensité (la température stagne autour de 0°C) et se produisent plutôt en fin de période nivale soit à la fin du printemps.

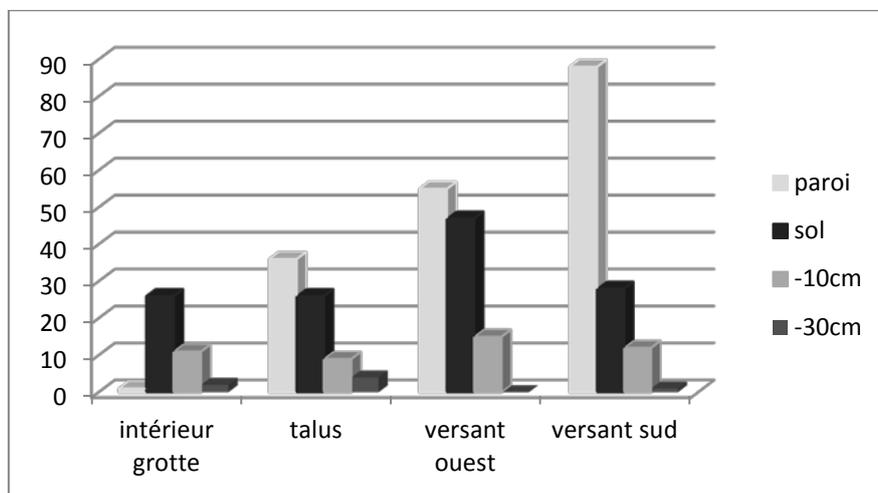


Figure 15 : Nombre moyen de cycles gel-dégel enregistrés annuellement dans les quatre stations implantées sur le site expérimental du programme « Gavarnie » (d'après Bertran *et al.* 2009).

Les enregistrements réalisés sur la butte qui domine la grotte donnent une bonne idée du régime thermique dans le sol, au niveau des cellules expérimentales situées à l'extérieur de la cavité. Les nôtres sont exclusivement installées sur le versant sud (fig. 16) en contrebas de la grotte. A la surface du sol, le nombre moyen de cycle gel-dégel sur le versant sud est inférieur à 30 par an, il n'est plus que d'une dizaine à 10cm de profondeur et à 30cm de profondeur, les cycles sont très exceptionnels.

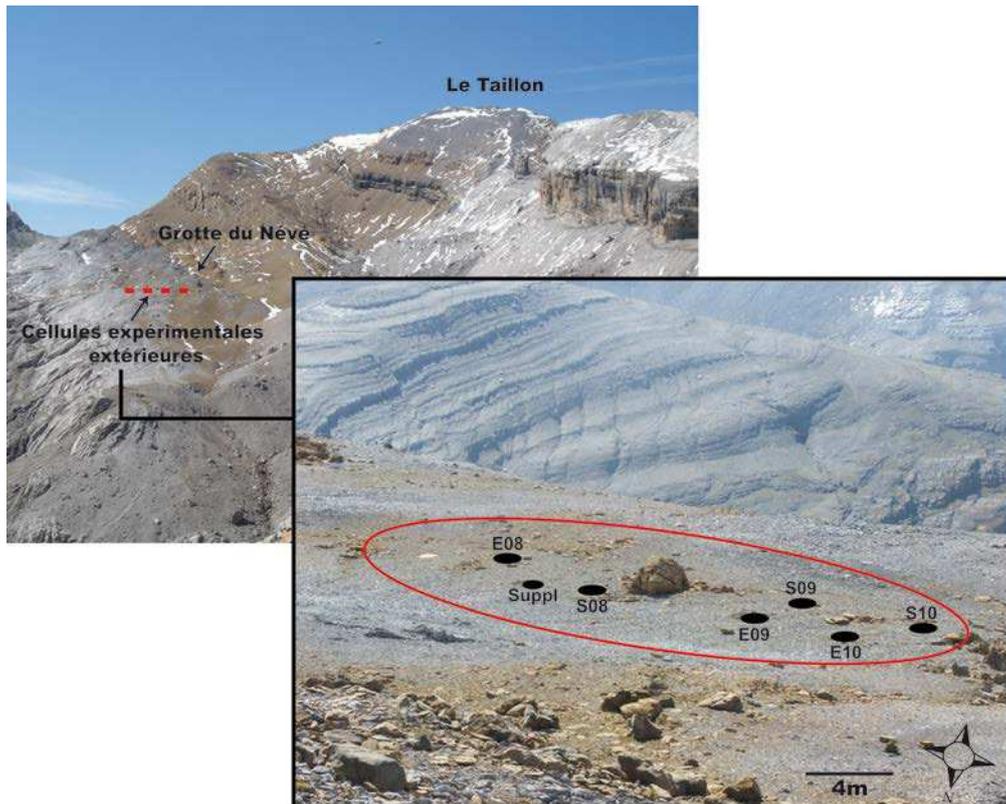


Figure 16 : Localisation des dépôts de charbons de bois et disposition des cellules extérieures sur le versant sud.

I.2. Protocole expérimental

I.2.1. Zone de dépôt et principaux effets actifs sur les cellules expérimentales (annexe III, planches 1 et 2)

La zone de dépôt choisie pour nos cellules expérimentales extérieures se situe en contrebas de la grotte, sur un replat, au bas du versant sud. La pente y est faible, elle varie de 0 à 15° environ sur l'ensemble de la surface concernée. Les dépôts sont situés en limite des fronts pierreux des coulées de solifluxion. La surface du sol est caractérisée par un pavage de plaquettes calcaires, dont la remontée par cryoexpulsion est favorisée par la faible végétalisation. Au niveau stratigraphique, l'empilement de coulées successives génère une alternance de couches de cailloutis riche en matrice sablo-limoneuse, correspondant au cœur des coulées, et de couches caillouteuses ouvertes, qui représentent les pavages et les fronts enfouis.

A la surface du sol, des figures de tri (notamment des petits sols polygonaux dont la végétation tend à recoloniser les cloisons caillouteuses et qui semblent peu actifs) sont visibles.

Localement, les principaux phénomènes agissant directement sur les cellules expérimentales et le matériel qu'elles contiennent sont :

- les alternances gel-dégel (gélifraction, cryoexpulsion, cryoreptation, avancée des fronts de coulées de solifluxion)
- les ruissellements lors des orages et de la fonte du couvert neigeux
- le vent

Les principaux effets induits sont :

- la fragmentation des charbons de bois
- le déplacement latéral et vertical du matériel
- la disparition du matériel (perte par dispersion et enfouissement sous les coulées, destruction par hyper-fragmentation)

I.2.2. Composition des cellules expérimentales

Les charbons utilisés comme matériel expérimental à Gavarnie proviennent de feux réalisés par Isabelle Théry-Parisot et Maria Ntinou entre 2004 et 2005 au Laboratoire du Cepam (Programme ACI, ITP, dir.). Les combustions ont été menées en foyer ouvert (cheminée). La température maximale moyenne atteinte dans les feux est de 839°C, alors que la température moyenne supérieure à 100°C est de 330°C.

Les cellules expérimentales sont chacune composées de charbons de bois issus de 7 espèces : *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Pinus pinaster*, *Pinus halepensis*, *Populus alba* et *Quercus pubescens*. Quinze fragments par espèce (entre 1.5 et 4cm de côté environ) sont prélevés dans les résidus de ces combustions, soit 105 fragments déposés par cellule. Les lots de charbons de chaque taxon ont fait l'objet d'une pesée globale avant le dépôt.

I.2.3. Types de dépôts et durée d'exposition (annexe III, planches 2, 3 et 4)

Au total, huit cellules composées de quinze fragments par espèces et une cellule témoin sont constituées pour servir à différents types de dépôts :

En extérieur, sur le versant sud (fig. 16) :

- trois cellules sont déposées directement à la surface du sol
- trois cellules sont enterrées à 5cm de profondeur
- une cellule témoin supplémentaire comprenant un seul très gros fragment de charbon par espèce a également été enterrée à 5cm de profondeur.

À l'intérieur de la cavité :

- deux cellules sont déposées en surface, l'une à l'entrée de la grotte, l'autre au fond.

Les dépôts ont été réalisés lors de la mission de septembre 2006. Chaque année jusqu'en 2008, une nouvelle mission a été effectuée dans le cadre du programme « Gavarnie ». Nous avons prolongé l'expérimentation, et donc nos visites sur site, à titre personnel lors de missions couvertes par le Laboratoire du Cepam en 2009 et 2010 après la fin du programme⁶.

De 2008 à 2010, une cellule enterrée et une cellule de surface ont été prélevées chaque année sur le versant.

Les dépôts réalisés à l'intérieur de la cavité ont évolué extrêmement lentement. Une des cellules a été prélevée en 2008. La seconde est toujours sur site, de même que la cellule témoin sur le versant. Celles-ci seront récupérées dans plusieurs années et permettront de recueillir des informations sur le plus long terme.

⁶ Nous ne disposons donc pas des enregistrements thermiques de ces deux dernières années et nous fondons sur le régime thermique général du site, bien documenté par les cinq précédentes années d'enregistrement.

I.2.4. Limites du protocole expérimental et contraintes de terrain : les adaptations possibles

La mise en place d'expérimentations en « contexte naturel » présente l'intérêt d'être plus proches des conditions archéologiques que les expériences en conditions contrôlées de laboratoire. Cependant, l'expérimentation en conditions non (ou moins) contrôlées induit de fait un certain nombre de limites dont il nous paraît important de faire état.

Une partie des limites auxquelles nous nous sommes confrontée dépendent du protocole mis en place, d'autres découlent des contraintes de terrain. Elles induisent plusieurs types de difficultés à l'heure du traitement, de l'analyse du matériel et de l'interprétation des résultats.

I.2.4.1. Contraintes de prélèvement en haute montagne

La dispersion des cellules extérieures (particulièrement celles déposées en surface) au cours des quatre années d'expérimentation est importante et couvre plusieurs mètres carrés. Compte tenu de la marche d'approche conduisant au site, relativement longue et escarpée (environ 16km A/R, 1200m de dénivelé positif et négatif cumulé) et du matériel transporté dès l'aller (théodolite, carroyage, outils, caisses de prélèvement, matériel d'installation de la station météo –rééquipée en 2007– etc.), la possibilité de prélèvement était, de fait, limitée. Il nous était par exemple impossible de pratiquer une fouille exhaustive de la zone de dispersion totale des cellules de surface avec prélèvement du sédiment sur plusieurs mètres carré en vue de son tamisage en laboratoire ; la quantité de sédiment aurait été tout bonnement intransportable sans une logistique beaucoup plus lourde, impossible à mettre en œuvre dans le cadre de missions de courte durée.

Le mode de prélèvement (présenté en détail dans la partie suivante) a donc dû être adapté à la réalité du terrain. Il a été le plus exhaustif possible dans la mesure de nos moyens, mais induit nécessairement une perte de matériel directement liée au mode opératoire. Même si nous avons fait notre maximum pour la minimiser, celle-ci reste difficilement quantifiable et les conditions expérimentales diffèrent ici d'un contexte de fouille archéologique, qui par sa durée, permet généralement de remédier aux contraintes de terrain (redescente du matériel

étalée sur plusieurs jours, équipe plus nombreuse, possibilité d'un convoi mécanisé en amont et aval de la fouille, etc.).

I.2.4.2. Protocole et contraintes d'analyse du matériel

Mise en place dans les premiers mois de notre travail de thèse, nous n'avions pas mesuré l'implication de certaines contraintes de notre protocole. L'une des contraintes majeures est induite par le dépôt de plusieurs taxons, regroupés dans chaque cellule expérimentale. Ce mode de dépôt nous a obligée à identifier chaque fragment individuellement de manière à pouvoir accéder à l'information spécifique. Or, même si l'identification est évidemment plus simple et rapide lorsque l'on connaît les espèces présentes dans l'échantillon, cette phase, ajoutée au tri du matériel rendu nécessaire par la présence de végétaux en grande quantité dans les refus de tamis, a beaucoup alourdi le travail en laboratoire et nous a fait perdre un temps précieux.

Par ailleurs, afin d'éviter les risques d'erreur, nous avons regroupé en un seul taxon (*Pinus*) deux essences, le pin d'Alep et le pin maritime anatomiquement difficiles à discriminer (les calculs tiennent évidemment compte de ce regroupement).

I.2.4.3. Adaptations possibles du protocole (avis aux futurs expérimentateurs...)

On est toujours pris, à l'heure de la mise au point d'un protocole expérimental, entre des contraintes contradictoires. La vraisemblance des conditions expérimentales avec les contextes archéologiques que l'on cherche à éclairer nécessite que l'impact du protocole et de l'expérimentateur lui-même soient les plus ténus possibles. Un contrôle et un « interventionnisme » minimales sont alors recherchés, mais cette démarche laisse la place à des aléas parfois difficiles à interpréter. A l'inverse, si l'on veut minimiser les aléas, la mise en place de conditions mieux contrôlées peut modifier, voire fausser le déroulement « naturel » de l'expérimentation. De même, l'aspect pratique, la faisabilité technique et « l'interprétabilité » des données *a posteriori* doivent être pris en compte. Le protocole est donc nécessairement le résultat d'un compromis, par essence imparfait.

Dans notre cas, la phase d'identification, extrêmement chronophage, aurait pu être évitée par la multiplication des cellules expérimentales, en séparant chaque essence dans un dépôt individuel. Ceux-ci devront alors être suffisamment éloignés les uns des autres pour ne pas risquer de mélanges (à titre d'information, la dispersion maximale de nos cellules expérimentales est supérieure à 3.50m), ce qui induit une surface expérimentale autrement plus étendue. Ceci d'autant plus que l'on augmente ce faisant le risque de variabilité micro-locale des conditions. Le nombre de cellule par espèce doit alors permettre la réplique de l'information.

Le placement dans des contenants fabriqués en grillage à maille très fine (solution que nous avons parfois appliquée lors d'expériences ultérieures) permet la récupération rapide et exhaustive (jusqu'à la maille choisie) du matériel expérimental et évite les mélanges. Mais l'on ne peut alors mesurer la dispersion et la perte « naturelles » du matériel. De même, dans le cas présent, cela aurait modifié localement l'impact des processus liés à l'activité périglaciaire (mouvements verticaux empêchés, possible détournement des ruissellements, etc.).

Il n'y a donc pas de solution idéale, mais nous conseillons néanmoins à ceux qui souhaiteraient faire de nouvelles observations *in situ* de prévoir un protocole permettant la récupération séparée et directe des essences. Quoi de moins excitant pour un anthracologue que d'étudier un échantillon dont il connaît déjà la composition floristique !

Pour autant, l'expérimentation mise en place à Gavarnie nous permet d'accéder à une information riche et diversifiée, bien que soumise aux aléas inévitables évoqués précédemment.

I.2.5. Prélèvement, traitement et analyse du matériel

Plusieurs types d'informations sont relevés lors de la phase de prélèvement :

- aspect général des cellules expérimentales (visibilité des concentrations initiales, intensité de la fragmentation)
- dispersion latérale du matériel
- dispersion verticale du matériel

I.2.5.1. Prélèvement des dépôts de surface

La structure du sol et notamment le pavage de plaquettes en surface limite une percolation en profondeur des grosses particules. En revanche, le déplacement des charbons de bois et des plaquettes sous l'effet du gel aux intersaisons, des orages estivaux et des ruissellements de fonte du couvert neigeux, induit un mélange progressif charbons/plaquettes auquel il convenait d'être attentif.

Compte tenu de ces observations et des contraintes précitées (impossibilité de récupération exhaustive du sédiment sur plusieurs mètres carrés), le prélèvement des cellules de surface a consisté en un ramassage manuel minutieux. La dispersion latérale des fragments est évaluée par la prise de mesures entre le cœur de la cellule initialement déposée et les fragments épars autour de la concentration. Le prélèvement est effectué par cercles concentriques dans des sacs séparés : >1m, 50cm-1m, cœur cellule-50cm. Une fois le prélèvement de surface effectué, le soulèvement des plaquettes et blocs plus importants a permis la récupération des fragments dispersés sous les pierres. Le sédiment sous-jacent a été récupéré *a minima* sous la concentration principale et les éventuelles concentrations secondaires, afin d'en extraire par flottation les quelques fragments infiltrés sous la couche de plaquettes et d'évaluer l'importance de la fraction carbonneuse fine.

I.2.5.2. Prélèvement des dépôts enterrés

En revanche, le prélèvement des cellules initialement enterrées dans le sédiment directement sous-jacent à la couche de plaquettes devait nécessairement s'effectuer en masse. Nous avons donc « ramassé » dans un sac à part les charbons dispersés, puis collectés séparément les charbons visibles à la surface de la cellule et enfin, fouillé le cœur de la cellule par passes de 5cm. Les charbons sont donc prélevés avec le sédiment englobant en vue de sa flottation en laboratoire. Un lit de cailloutis mêlé de limons autour de 10cm de profondeur a empêché la percolation du matériel en profondeur ; au-delà de cette limite, les particules de charbon sont invisibles à l'œil nu.

I.2.5.3. Traitement en laboratoire

Le sédiment est ensuite flotté sur une colonne de tamis (500µm, 1mm, 2mm, 4mm) en laboratoire. Les charbons, souvent pris dans le tissu racinaire dense (bien que la végétation soit peu développée à cet étage, les petites touffes de pelouse rase sont nombreuses) sont dégagés le plus délicatement possible sous l'eau pour ne pas accentuer la fragmentation. Les plus grosses particules végétales sont retirées du refus de tamis. De nombreuses petites particules végétales sont cependant présentes dans le résidu de flottation. Cela a donc induit une phase de tri conséquente (notamment concernant la petite fraction) après un séchage à température ambiante suffisamment long pour que les restes de végétaux deviennent secs et friables.

I.2.5.4. Analyse du matériel

Une fois extraits du sédiment, séchés et triés, les fragments de charbon de bois sont identifiés par observation au microscope photonique à réflexion selon la méthode classiquement utilisée en anthracologie (observation sur cassures fraîches dans les trois plans anatomiques du bois).

Les charbons >4mm sont intégralement étudiés pour toutes les cellules, à l'exception de la cellule prélevée à l'intérieur de la cavité qui a seulement fait l'objet d'un comptage en raison de la très faible fragmentation du matériel.

Les fragments supérieurs à 4mm sont pesés et mesurés individuellement à l'aide d'un pied à coulisse. Les charbons de bois ne formant pas un parallélépipède absolument régulier, les mesures (au millimètre près) sont prises de manière à être les plus représentatives possibles du volume du fragment (longueur, largeur et hauteur moyennes).

Les classes]1-2mm] et]2-4mm] sont intégralement étudiées pour les cellules enterrées prélevées en 2008 et 2010 ; les pesées sont réalisées par taxon et non par fragment. Une évaluation quantitative est réalisée pour les cellules de surface des mêmes années ; le nombre de fragments est obtenu par analyse d'image (décompte pour la classe]2-4mm] et estimation pour la classe]1-2mm] / cf. chapitre II § II.1).

Au total, 5988 fragments de charbons de bois ont été identifiés par observation microscopique, dont 2708 sont pesés et mesurés individuellement. 6389 fragments supplémentaires sont comptabilisés et pesés par classe de taille ([1-2mm], [2-4mm]).

I.3. Présentation des résultats

I.3.1. Fonctionnement et altération des cellules expérimentales

I.3.1.1. Observations générales et temporelles

- *Dépôts à l'intérieur de la cavité*

Comme cela était prévisible au vu des données thermiques présentées plus haut, l'évolution des cellules est bien moins rapide à l'intérieur de la cavité que sur les versants. Dans la grotte, la fragmentation est quasiment nulle. Il en est de même pour le déplacement des charbons de bois.

La cellule déposée au fond de la grotte (et encore présente sur site) a permis d'observer son évolution à plus long terme. À partir de la troisième année de dépôt, de rares petits fragments détachés des plus gros commencent à être visibles. La base de la cellule est très légèrement prise dans une matrice plus fine qui se dépose visiblement par ruissellement. Celui-ci doit être de faible intensité car le déplacement des charbons n'est pas perceptible, même après quatre années d'exposition (voir planches 2 et 4, annexe III).

Dans la grotte du Névé, d'autres dépôts, notamment de silex disposés en amas et en lignes, ont été effectués. Les déplacements de ces vestiges sont notables et parfois plus importants que sur les versants. Il en est de même pour la perte de matériel. Ces dépôts étaient disposés sur la partie interne du talus détritique et sont largement affectés par les coulées de débris. Un des amas, situé à gauche de l'entrée est beaucoup mieux préservé n'ayant pas subi l'influence des coulées (Sasias, 2006). L'activité détritique agit donc préférentiellement sur le côté droit de l'entrée de la cavité. Les coulées affectent peu la zone à gauche où se trouve notre première cellule et encore moins le fond de la grotte puisque la seconde cellule n'a été ni recouverte, ni déplacée après quatre années de dépôt.

Les processus qui affectent l'intérieur de la cavité et les versants sont différents. L'activité liée au gel y est très réduite et le détritisme est le facteur majeur d'altération dans la cavité. Celui-ci est relativement localisé. En dehors de la zone de forte activité détritique, la conservation dans la grotte est bien meilleure que sur les versants, jouant un rôle tampon vis-à-vis de la rudesse des conditions extérieures et atténuant les effets des processus météoriques.

- *Dépôts extérieurs : surface/enterrés*

À l'extérieur, sur le versant, les dépôts ont évolué de manière beaucoup plus intense et rapide (annexe III, planches 3 et 4).

Dès la première année, deux phénomènes distincts affectent les cellules selon le type de dépôt :

- d'une part, un début de dispersion des charbons déposés en surface (celle-ci est encore légère et les concentrations initiales sont clairement visibles).
- d'autre part, l'apparition en surface d'une partie des charbons initialement enterrés.

Celle-ci est probablement liée à deux phénomènes :

l'action du gel et le ruissellement. Les charbons semblent en effet avoir fonctionné en partie comme les plaquettes calcaires, à savoir qu'étant plus denses et volumineux que les particules fines qui les recouvraient, ils sont remontés à la surface par l'action du gel. Par ailleurs, une partie des charbons de certaines cellules se sont concentrés en périphérie de la zone de dépôt et ont visiblement été charriés par ruissellement. Ces ruissellements ont également pu participer du déterrement des charbons en « embarquant » une partie des particules fines.

Si l'évolution à l'échelle des cellules est indéniable, les charbons eux semblent intacts. Leur fragmentation après un an de dépôt est très réduite, voire nulle. Pour cette raison, nous n'avons prélevé aucune cellule en 2007.

Les deux phénomènes notés la première année s'accroissent par la suite.

La dispersion des cellules de surface se poursuit jusqu'à ce que les concentrations initiales soient quasiment invisibles en 2010 (annexe III, planches 4 et 5, cellule 3'). Parallèlement, la fragmentation des charbons s'intensifie.

En revanche, l'expulsion d'une partie des charbons enterrés, si elle se prolonge, n'aboutit pas au déterrement complet des cellules. Plusieurs phénomènes se surajoutent en effet. D'une part, la dispersion du matériel, sa fragmentation de plus en plus importante et son recouvrement progressif par les plaquettes. Le pavage homogène de la zone se reconstitue peu à peu. En fin de période (2010), la concentration initiale est à peine plus visible que dans le cas des cellules de surface (annexe III, planches 4 et 6, cellule 4').

I.3.1.2. Déplacements verticaux dans les dépôts enterrés

Nos observations de terrain permettent d'envisager des mouvements verticaux des charbons de bois, notamment liés à l'action du gel comme le montre la distribution verticale des charbons de bois (>4mm) en fonction de leur masse individuelle. L'histogramme ci-dessous met en évidence une évolution très nette entre 2008 et 2010 (fig. 17). En 2008, la masse des charbons de bois est liée de manière quasi linéaire à la dispersion et l'enfouissement : les charbons les plus légers sont ceux que l'on retrouve dispersés, les plus lourds sont enfouis au cœur de la cellule, les charbons qui affleurent en surface ont une masse intermédiaire. En 2010, des charbons un peu plus lourds ont pu être entraînés en dehors de la cellule, mais surtout, la situation s'inverse entre les charbons en surface et ceux composant encore le cœur de la cellule. Les charbons les plus lourds se situent maintenant en surface de la cellule et ceux au cœur de la cellule sont presque deux fois plus légers qu'en 2008.

L'évolution est encore plus marquée si l'on considère l'erreur standard (tableau 2). Cela signe de manière assez claire l'inversion stratigraphique classique liée au gel : les particules les plus grosses et denses remontent par cryoexpulsion, tandis que les plus fines sont recouvertes.

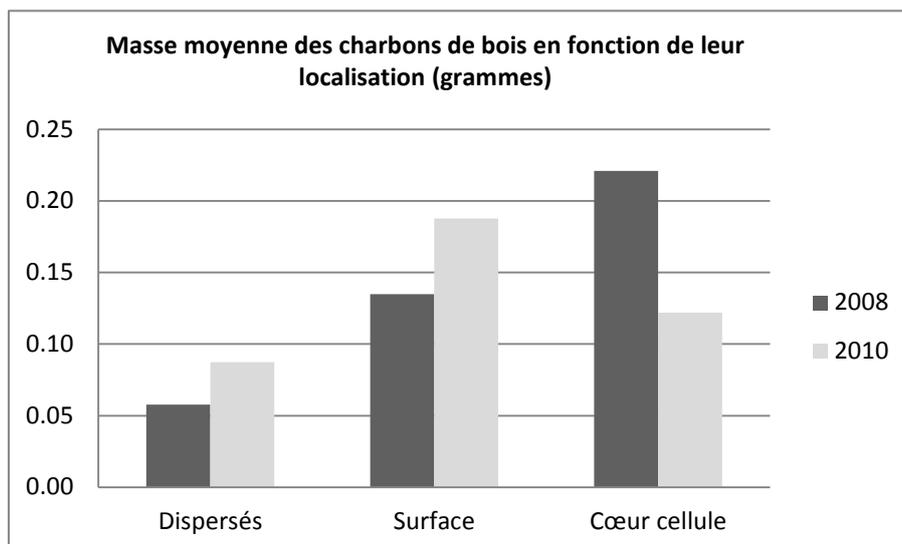


Figure 17 : Évolution de la répartition des charbons de bois dans les cellules enterrées en fonction de leur masse entre 2008 et 2010

LOCALISATION CHARBONS	2008	sd	2010	sd
Dispersés	0.06	0.05	0.09	0.11
Surface	0.13	0.18	0.19	0.27
Cœur cellule	0.22	0.34	0.12	0.18

Tableau 2 : Masse moyenne des charbons de bois selon leur localisation (dispersés, en surface, cœur de la cellule) et erreur standard

Notons également que la masse moyenne des charbons les plus lourds est moins élevée en 2010 qu'en 2008 ; ceci est à mettre en lien avec le processus de fragmentation à l'œuvre dans les dépôts, et non avec une éventuelle perte de masse volumique liée à l'altération du matériau lui-même. Sur le plan macro comme microscopique, aucune altération du matériau n'est perceptible au terme de l'expérience. Qui plus est, la masse volumique moyenne par taxon n'enregistre pas de diminution d'une année à l'autre (fig. 18)⁷.

⁷ Au contraire, la masse volumique tendrait plutôt à augmenter qu'à diminuer, ceci est peut-être à mettre en lien avec une augmentation de la microporosité permettant une plus grande absorption de l'humidité ambiante (et/ou des minéraux du sol). L'augmentation visible de la variabilité de la masse volumique est due à l'imprécision de la mesure du volume, particulièrement sur les petits fragments (mesure au pied à coulisse sur un fragment qui ne constitue pas un parallélépipède régulier, cf. § 1.4.5.4.). On notera par ailleurs la différence de masse volumique entre les échantillons fabriqués en four à moufle (chapitre 3) et ceux obtenus en foyer ouvert, ces derniers étant globalement moins denses. En revanche les différences observées entre taxons sont identiques (*Quercus* et *Carpinus* présentent une densité plus élevée que les autres taxons).

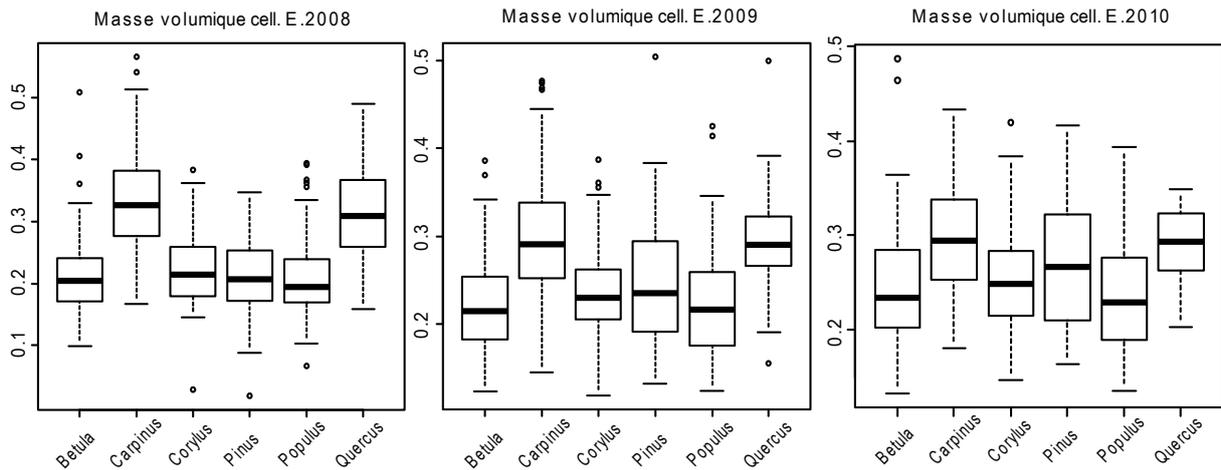


Figure 18 : Masse volumique moyenne par taxon dans chacune des cellules enterrées

I.3.1.3. Dispersion, perte et fragmentation du matériel

Un taux de dispersion, de fragmentation et de disparition du matériel expérimental (tableau 6) a été calculé pour chacun des dépôts. Nous considérons ici uniquement les fragments >4mm afin de pouvoir comparer la globalité des cellules.

Le taux de dispersion correspond au pourcentage de fragments dispersés (c'est-à-dire localisés hors de la cellule expérimentale initialement déposée) par rapport au nombre total de fragments prélevés. Le taux de fragmentation est issu du rapport entre le nombre de fragments prélevés et le nombre de fragments initialement déposés (105 par cellule). Le taux de disparition peut être évalué à partir de la masse, il correspond à la différence entre la masse totale des fragments déposés et la masse totale des fragments prélevés (données brutes accessibles dans les tableaux 4 et 5).

Enfin, nous avons calculé un « facteur d'augmentation relatif » du nombre total de fragments. En effet, le facteur d'augmentation absolue (nombre de fragments prélevés/nombre de fragments déposés) n'a de sens que s'il tient compte de la perte de matière, variable au sein de chaque cellule, en fonction notamment du temps et surtout du type de dépôt.

	Masse moyenne déposée (g) par cellule	Masse moyenne >4mm prélevée par cellule (g)	Taux de disparition moyen >4mm (%)	Nb. moyen frags >4mm prélevés	Facteur d'augmt°. abs. du nb. de frags >4mm
Cellules enterrées	73.35	60.69	17.25	477	4.54
Cellules de surface	78.83	30.65	61.12	426	4.05

Tableau 3 : Masse moyenne déposée et prélevée, pourcentage de perte de masse moyenne et nombre final moyen de fragments par type de dépôt.

Si l'on considère les valeurs brutes moyennes par type de dépôt (tableau 3), le nombre de fragments >4mm prélevés (et donc le facteur d'augmentation absolue) est légèrement inférieur dans les cellules de surface, mais ce nombre de fragment total correspond à une masse prélevée bien inférieure. Les 477 fragments des cellules enterrées correspondent à une masse moyenne de 60.69 grammes, alors que les 426 fragments des cellules de surface ne correspondent qu'à 30.65 grammes. Concrètement, cela induit que les fragments >4mm prélevés dans les dépôts de surface sont beaucoup plus petits que ceux des cellules enterrées. Cela correspond logiquement à une fragmentation plus intense que ne reflète pas le nombre de fragment >4mm (l'intensité de la fragmentation est par ailleurs mise en évidence par l'importance de la fraction fine issue du tamisage dans les cellules de surface). A masse de dépôt relativement constante, le taux de disparition (perte de masse) dans les cellules de surface est beaucoup plus élevé et il nous faut donc raisonner sur cette disparition. Les facteurs d'augmentation absolue du nombre de fragments sont donc rapportés à la masse prélevée de chaque cellule, exprimée en pourcentage de la masse déposée. Le calcul de cette valeur, qui tient compte à la fois de la quantité de matière initiale et de sa diminution, autorise une comparaison en terme d'augmentation du nombre de fragments⁸.

⁸ Mise en garde : ramener ainsi à 100 la masse de charbon prélevée permet de rendre comparable l'information sur la fragmentation par un calcul simple et rapide. Cela revient cependant à considérer, et c'est donc un *a priori*, que la matière qui a disparu s'est comportée de la même manière, en termes de fragmentation, que la matière effectivement retrouvée. Le seul moyen d'éviter ce raccourci consisterait à mettre en œuvre une approche statistique probabiliste, autrement plus lourde et n'excluant pas pour autant le risque d'erreur. Nous n'avons pas jugé utile la mise en œuvre d'une telle démarche.

	Masse totale déposée (g)	Masse totale prélevée (g)	Masse prélevée >4mm (g)	% de masse >4mm
<i>Cellule enterrée 2008</i>	71.314	71.638	69.538	97.509
<i>Cellule enterrée 2009</i>	82.947	-	55.827	67.304
<i>Cellule enterrée 2010</i>	65.782	60.226	56.718	86.221
<i>Cellule surface 2008</i>	79.653	35.582*	32.517	40.824
<i>Cellule surface 2009</i>	98.130	-	35.811	36.494
<i>Cellule surface 2010</i>	58.718	32.873*	23.625	40.235
<i>Cellule grotte 2008</i>	73.395	73.574	73.319	99.896

Tableau 4 : Masse totale de charbon déposée et prélevée ; Masse prélevée >4mm et pourcentage de masse >4mm par cellule expérimentale. (Les valeurs suivies d'un astérisque ont été estimées à partir de la pesée d'un dixième des fragments triés des classes]1-2mm] et]2-4mm]. Pas d'évaluation quantitative de la fraction fine pour les cellules 2009).

	Nb. fragts. déposés	Nb. fragts. >4mm prélevés	Nb. de fragts. dispersés >4mm	Nb. fragts.]2-4mm]	Nb. fragts.]1-2mm]	Nb. total fragments
<i>Cellule enterrée 2008</i>	105	395	22	424	758	1599
<i>Cellule enterrée 2009</i>	105	622	38	-	-	-
<i>Cellule enterrée 2010</i>	105	414	97	544	1550	2508
<i>Cellule surface 2008</i>	105	340	108	540	1095*	1975
<i>Cellule surface 2009</i>	105	435	153	-	-	-
<i>Cellule surface 2010</i>	105	502	243	1268	3486*	5256
<i>Cellule grotte 2008</i>	105	151	0	36	0	187

Tableau 5 : Nombre de fragments déposés et prélevés par classe de taille ; Nombre de fragments dispersés >4mm par cellule expérimentale. Les valeurs avec un astérisque ont été estimées à partir de la pesée et du comptage d'un dixième du poids total des refus de tamis]1-2mm].

	Taux de dispersion >4mm (%)	Taux de fragmentation >4mm (%)	Taux de disparition >4mm (%)
<i>Cellule enterrée 2008</i>	5.57	276.19	2.49
<i>Cellule enterrée 2009</i>	6.11	492.38	32.70
<i>Cellule enterrée 2010</i>	23.43	294.29	13.78
<i>Cellule surface 2008</i>	31.76	223.81	59.18
<i>Cellule surface 2009</i>	35.12	314.29	63.51
<i>Cellule surface 2010</i>	48.41	378.1	59.77
<i>Cellule grotte 2008</i>	0	43.8	0.104

Tableau 6 : Taux de dispersion, de fragmentation et de disparition >4mm par cellule expérimentale

	Facteur d'augmentation absolue du nb de frags >4mm	Masse prélevée >4mm (% de la masse totale déposée)	Facteur d'augmentation relatif du nb de frags >4mm
<i>Cellule enterrée 2008</i>	3.76	97.51	3.86
<i>Cellule enterrée 2009</i>	5.92	67.30	8.73
<i>Cellule enterrée 2010</i>	3.94	86.22	4.57
<i>Cellule surface 2008</i>	3.24	40.82	7.93
<i>Cellule surface 2009</i>	4.14	36.49	11.35
<i>Cellule surface 2010</i>	4.78	40.23	11.88
<i>Cellule grotte 2008</i>	1.438	99.89	1.439

Tableau 7 : Facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments >4mm par cellule expérimentale

- *Liens entre les variables*

Toutefois, en amont du traitement de nos données, il nous a paru nécessaire de tester les éventuels liens existants entre les variables décrivant le comportement des charbons de bois. En effet, l'examen attentif des données brutes ainsi que quelques réflexions de bon sens nous poussent à penser que des liens importants existent entre les différents paramètres que nous cherchons à analyser. Un test de corrélation de Spearman (les variables ne suivent pas toutes la loi normale) a été pratiqué à partir des données brutes pour déterminer les liens existants entre la masse initiale déposée par cellule (g), la disparition – soit la perte de masse enregistrée après le prélèvement par rapport à la masse de départ –, le nombre de fragments dispersés et le nombre total de fragments prélevés.

Variables	Nb. frags. dispersés	Masse initiale déposée	Disparition (perte de masse)	Nb. total de frags.
Nb. frags. dispersés	1	0.124	0.613	0.328
Masse initiale déposée	0.124	1	0.371	0.493
Disparition (perte de masse)	0.613	0.371	1	0.137
Nb. total de frags.	0.328	0.493	0.137	1

Figure 19 : Matrice des corrélations de Spearman (les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0.05)

Interprétation du test :

Il existe bien des liens importants entre les variables.

La perte de masse (disparition) est corrélée à la masse initiale déposée et plus fortement au nombre de fragments dispersés. Le nombre total de fragments est, lui, fortement corrélé à la masse initiale déposée. En revanche, le nombre de fragments dispersés n'est pas significativement corrélé à la quantité de matière initialement déposée, ni au nombre total de fragments produits par l'expérimentation.

- La quantité de matière perdue dépend donc en partie de la quantité de matière initialement déposée : plus la quantité de matière déposée est importante, plus la part de cette matière qui peut disparaître (perte et hyper-fragmentation) augmente.
- La dispersion et la disparition sont corrélées : plus le matériel se disperse, plus il a de chance de disparaître (ou de ne pas être retrouvé).
- Plus la quantité de matière initialement déposée est importante, plus sa fragmentation produira un grand nombre de charbons de bois : à fragmentation d'égale intensité, une quantité $A > B$ produit un nombre de fragments $A > B$.

Ces liens sont logiques et semblent aller de soi. Pour autant, ils montrent bien que la plupart des variables dépendent les unes des autres et donc qu'un travail à partir des données brutes n'a pas de sens car les valeurs, prises séparément, ne reflètent qu'une partie de la réalité.

Pour cette raison, nos résultats sont exprimés sous forme de pourcentages et d'indices correspondant à la pondération ou au « déflatement » d'une valeur par une autre (le détail du calcul des indices est explicité dans le corps du texte en amont de leur utilisation).

▪ *Cellule intérieure*

Le calcul des indices de dispersion, de disparition et de fragmentation de la cellule prélevée à l'intérieur de la grotte en 2008 (tableau 6) confirme bien le caractère extrêmement atténué de l'altération du matériel à l'intérieur de la cavité. Le taux de dispersion est nul et 99.9% du matériel déposé est retrouvé après deux ans de dépôt. Le facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments est de 1.44 (on passe de 105 à 151

fragments) ; il est presque 3 fois moins important que pour la cellule enterrée prélevée la même année et 5.5 fois moins que la cellule de surface (tableau 7). Le niveau de conservation intérieur est sans commune mesure avec celui des versants.

- *Cellules extérieures*

Dispersion

Pour les cellules extérieures, la dispersion du matériel est monotone dans notre expérimentation : sans être linéaire, elle va croissante d'une année sur l'autre, quel que soit le type de dépôt (tableaux 5 et 6). Elle est beaucoup plus importante pour les cellules déposées en surface que pour les dépôts enfouis (de 5.7 à 2 fois plus selon les années), ce qui correspond à nos observations de terrain. La dispersion est par ailleurs beaucoup plus marquée à partir de la quatrième année, soit pour les prélèvements réalisés en 2010, où elle atteint presque 50% dans le dépôt de surface.

Disparition

En revanche, la perte de matière (taux de disparition) n'est pas monotone dans cette expérimentation. Elle est très importante pour les dépôts de surface et reste relativement stable au cours des trois années de prélèvement, tournant autour de 60% (de 59.18 à 63.51 %).

Pour les dépôts enterrés, elle est quasiment nulle en 2008 (2.49%). Si l'on prend en considération la fraction fine (1 à 4mm), la totalité de la masse de charbon déposée en 2006 est retrouvée en 2008⁹, alors le taux de perte s'élève déjà presque à 60% pour le dépôt de surface prélevé la même année.

Le taux de disparition de la cellule enterrée prélevée en 2009 est très élevé en regard des autres dépôts du même type. Cela est peut-être à mettre en relation avec des conditions micro-locales différentes (microtopographie, intensité des processus périglaciaires, couvert

⁹ La masse totale prélevée est d'ailleurs légèrement plus élevée que la masse initialement déposée. Cela est dû à la présence d'une fine couche de sédiment, qui persiste à la surface et à l'intérieur des charbons de bois, même après lavage du matériel. C'est le cas dans la plupart de nos expérimentations et cela a parfois rendu difficile un travail précis sur les poids.

neigeux, parcours des ruissellements). Ceci semble être confirmé par l'intensité de la fragmentation de cette cellule, bien supérieure aux autres dépôts.

Fragmentation

105 fragments ont été déposés par cellule en septembre 2006. Deux ans plus tard, en septembre 2008, le nombre total de fragments (classes]1-2mm],]2-4mm] et >4mm) s'élève à 1599 (toutes les classes de fragments ont été étudiés) pour la cellule enterrée et à 1975 (le nombre de fragments des classes]1-2mm] et]2-4mm] est évalué à partir du tri et du comptage d'un dixième des fragments ; la classe >4mm est entièrement étudiée) pour la cellule de surface. En 2010, soit après quatre années de dépôt, la cellule enterrée présente 2508 fragments (étudiés) pour 5256 (estimés) dans la cellule de surface (tableau 5). Le nombre de fragments est multiplié en moyenne par 17 en deux ans et 37 en quatre ans.

À l'échelle de la classe de taille >4mm, si l'on exclut la cellule enterrée de 2009, la fragmentation semble relativement monotone en fonction du type et du temps de dépôt.

Elle est plus importante pour les dépôts de surface que les dépôts enterrés (facteur d'augmentation relatif de 2.1 à 2.6 fois plus élevé).

Pour les dépôts de surface, la fragmentation augmente de manière importante après la troisième année de dépôt (2009), augmentation stable l'année suivante.

Pour les dépôts enterrés, le facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments est 1.9 fois plus élevé en 2009 qu'en 2010.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer en partie l'intense fragmentation des dépôts 2009. Si l'on se reporte au tableau 4, la masse des échantillons déposés (en surface comme enfouis) est largement supérieure aux autres dépôts. Les charbons y étaient plus gros. Or, plus la quantité (et le volume) de matière déposée est importante, plus elle offre de possibilité de fragmentation. Par ailleurs, l'intense fragmentation de ces échantillons est peut-être à mettre en lien avec une variation des conditions à l'échelle micro-locale : accentuation dans la zone de dépôt 2009 ou, au contraire, atténuation dans la zone de dépôt 2010.

Notons que la zone de dépôt 2010, située à proximité d'un petit ensemble de blocs et caractérisée par une déclivité plus importante, semble favorable à l'accumulation d'un

couvert neigeux plus épais et donc plus persistant. Cela est en partie confirmé par nos observations de terrain datant de 2008 : la zone expérimentale n'était pas encore déneigée lors de notre arrivée sur le site et les dépôts 2010 étaient encore recouverts à la mi-septembre. La pente plus importante explique également en partie l'intense dispersion du matériel des dépôts 2010 ; au-delà du facteur temps qui a évidemment une incidence, la zone draine sans doute largement les ruissellements en période de fonte et lors des orages estivaux. Les phénomènes de ruissellement jouent visiblement un rôle majeur dans la dispersion du matériel. L'analyse des déplacements des dépôts de silex et d'os menée par Marion Sasias dans son mémoire de master (2006) montre l'importance du facteur saisonnier dans les déplacements, qui ont majoritairement lieu en été. Ils sont liés i) aux ruissellements de fonte, ii) aux orages estivaux, iii) au vent, et sont bien sûr accentués par iv) la gravité.

I.3.2. Niveau d'information taxonomique

Ayant précisé le fonctionnement général des dépôts à l'échelle de la cellule expérimentale, il convient désormais d'observer le comportement individuel des taxons. Le taux de perte, de dispersion et de fragmentation (facteur d'augmentation relatif) est calculé pour chacune des essences testées afin de mettre en évidence d'éventuelles différences de conservation.

I.3.2.1. Pourcentage de disparition par taxon en fonction du type de dépôt et de l'année de prélèvement

Dans les cellules enterrées, le taux de disparition est, nous l'avons vu, très faible en 2008, plus élevé en 2010 et beaucoup plus élevé en 2009. Ces observations sont généralisables à l'échelle des taxons. Leur comportement est relativement variable dans les trois dépôts, à l'exception de *Populus*, qui présente toujours des valeurs plus hautes que les autres essences et *Pinus*, dont le taux de perte est plutôt faible dans les trois prélèvements (fig. 20).

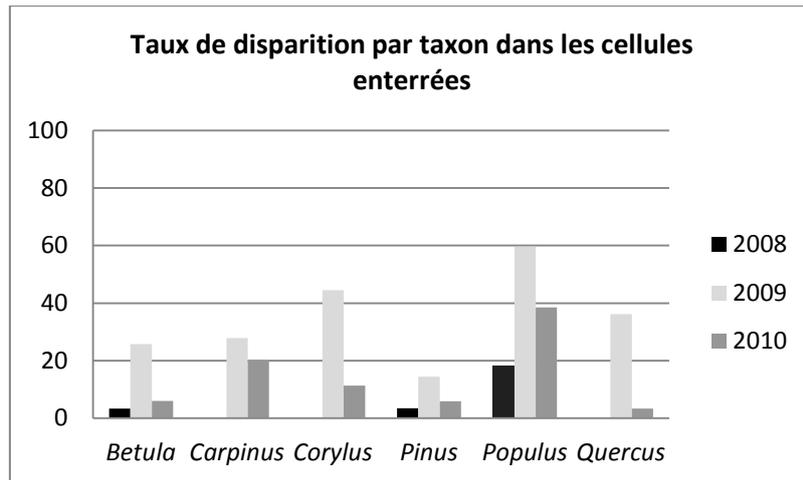


Figure 20 : Pourcentage de perte par taxon dans les trois cellules enterrées

Le taux de disparition est plus élevé dans les dépôts de surface. Il est relativement stable entre les années et les taxons sont affectés de manière assez homogène. Aucune espèce ne sort réellement du lot et aucune différence n'est constante sur les trois années de prélèvement (fig. 21).

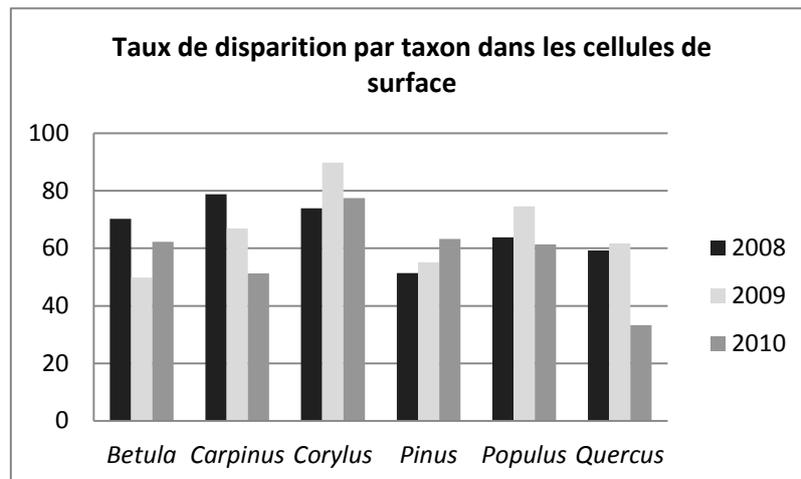


Figure 21 : Pourcentage de perte par taxon dans les trois cellules de surface

I.3.2.2. Pourcentage de fragments dispersés par taxon en fonction du type de dépôt et de l'année de prélèvement

La dispersion des taxons depuis les cellules initialement enfouies augmente avec le temps. Elle va croissante pour tous les taxons, à l'exception de *Pinus* qui présente des valeurs relativement hautes en 2008 (comparativement aux autres taxons), moyennes en

2009 et très faibles en 2010. Le taux de dispersion de *Populus* est important quelle que soit l'année considérée. *Quercus* et *Corylus* sont faiblement dispersés jusqu'en 2010, tandis que *Betula* et plus encore *Carpinus* voient leur taux de dispersion s'intensifier en 2010 (fig. 22).

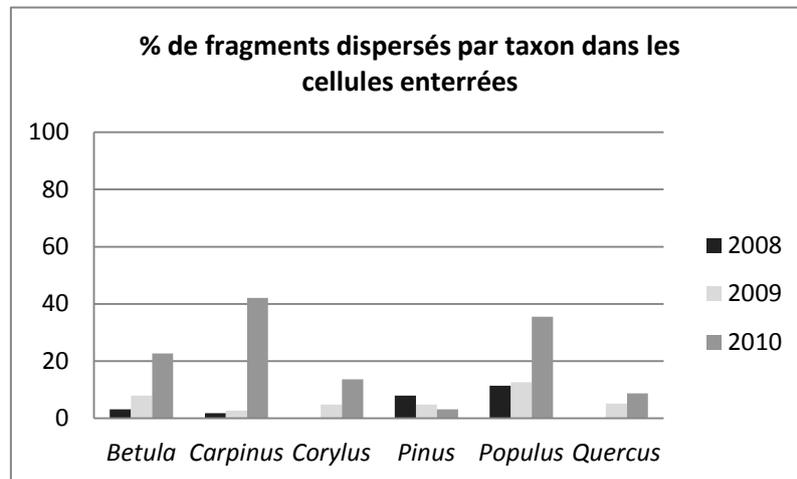


Figure 22 : Pourcentage de fragments dispersés par taxon dans les trois cellules enterrées

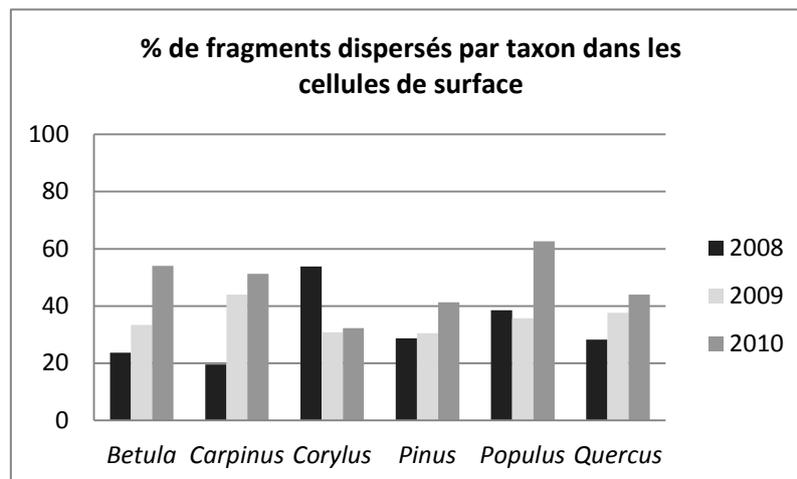


Figure 23 : Pourcentage de fragments dispersés par taxon dans les trois cellules de surface

Encore une fois, la différence est nette avec les cellules de surface au sein desquelles la dispersion affecte toutes les essences de manière indifférenciée. Elle est relativement homogène entre les taxons et légèrement croissante avec les années, à l'exception de *Corylus* dont le taux de dispersion est plus élevé en 2008 (fig. 23).

I.3.2.3. Fragmentation des taxons par type de dépôt et par année

Le facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments a été calculé par taxon pour chacun des dépôts. Les représentations graphiques ci-dessous (fig. 24 à 26) permettent de visualiser l'évolution du comportement des charbons de bois en fonction de l'essence et du type de dépôt par année. Un certain nombre d'observations peuvent être faites :

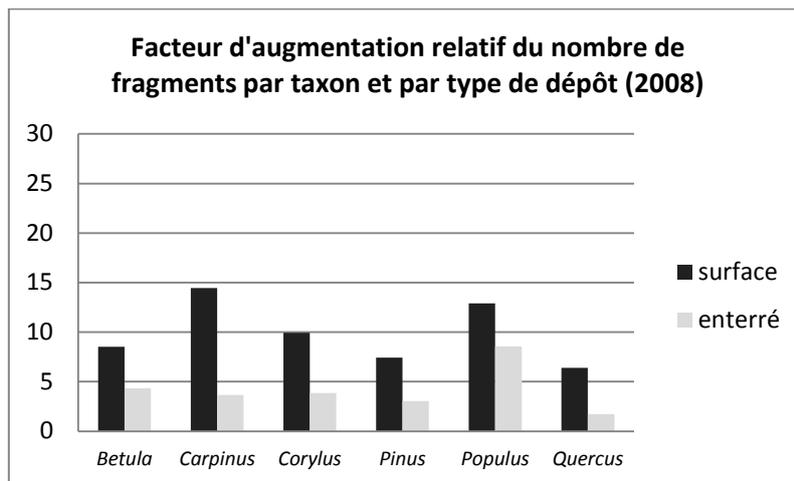


Figure 24 : Facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments par espèce en 2008 en fonction du type de dépôt.

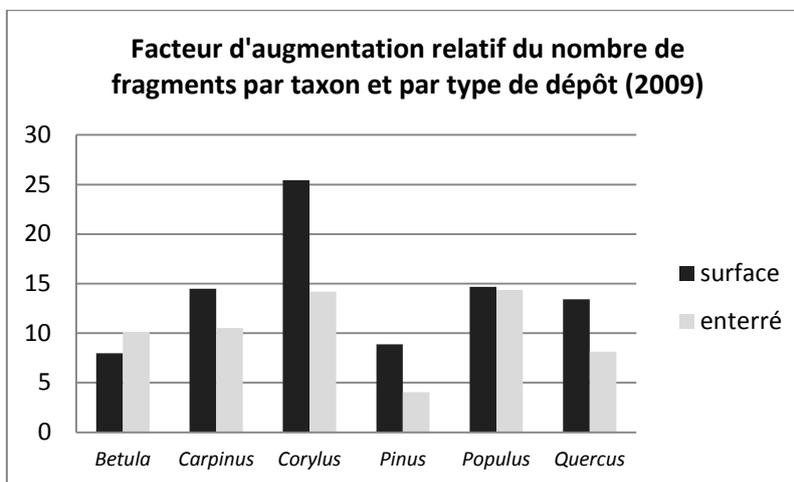


Figure 25 : Facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments par espèce en 2009 en fonction du type de dépôt.

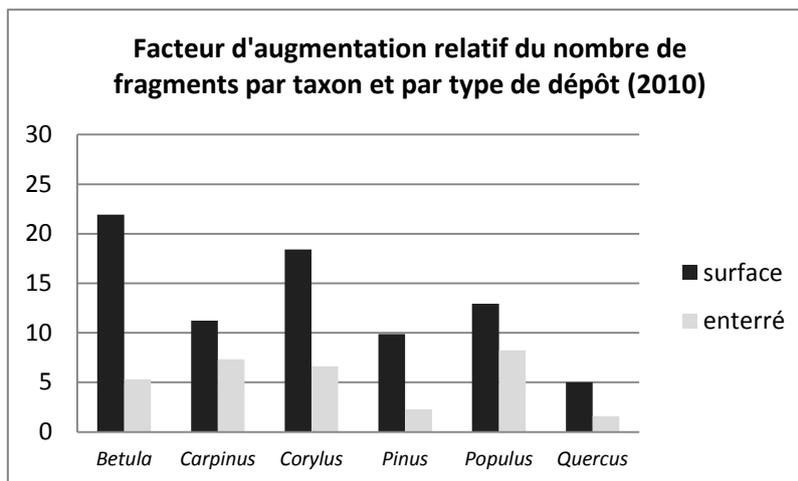


Figure 26 : Facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments par espèce en 2010 en fonction du type de dépôt.

La sur-fragmentation des dépôts de surface par rapport aux dépôts enterrés s'exprime pour toutes les essences et toutes les années à l'exception de *Betula*, dont la fragmentation est légèrement supérieure dans le dépôt enterré prélevé en 2009.

La fragmentation au sein du dépôt enterré 2008 est relativement faible et stable pour tous les taxons (seul *Quercus* présente une fragmentation légèrement inférieure et *Populus* légèrement supérieure aux autres taxons). A l'inverse, dans le dépôt de surface la même année, la fragmentation est déjà importante, mais aussi variable entre les taxons. Cela va dans le sens d'un ralentissement de l'évolution dans les cellules enfouies.

A l'exception de *Corylus* dans la cellule de surface 2009 et *Betula* dans la cellule de surface 2010, qui atteignent des niveaux de fragmentation largement supérieurs aux autres taxons, les essences ne montrent pas de différences très marquées. Toutefois, si la fragmentation des essences semble *a priori* rester dans une même moyenne, certaines différences visibles paraissent aussi relativement constantes. Les valeurs de *Quercus* et *Pinus* notamment, sont généralement parmi les plus basses.

I.3.3. Analyse statistique

L'observation des histogrammes ci-dessus fait apparaître un fort effet du facteur « type de dépôt » sur les variables, mais les facteurs temporels et spécifiques peuvent également avoir une incidence. Afin de mesurer l'incidence et le poids des différents facteurs, un test d'Anova est réalisé pour les variables « disparition » (masse prélevée/masse

déposée), « dispersion » (nombre dispersés/nombre total de fragments) et « facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments ». Les données suivent la loi normale ou s'en rapprochent. Le test de Bartlett, réalisé sur les séries des trois années de prélèvement, indique que la variance des lots (n=12 par année : 2 types de dépôts x 6 espèces) est homogène pour les trois variables analysées.

I.3.3.1. Disparition

La régression de la variable « disparition » (n=2 x 6 x 3) indique que 80.2% (R² ajusté) du modèle est expliqué par les facteurs sélectionnés. L'analyse de variance confirme que **le type de dépôt est le facteur le plus incident sur la disparition**. La p-value est cependant significative pour les facteurs « espèce » et « année » (fig. 27), mais la valeur de F est beaucoup moins élevée. La variance inter-groupe est donc plus faible pour ces deux modalités.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Espèce	5	0.229	0.046	2.988	0.028
Type de dépôt	1	1.899	1.899	123.683	< 0.0001
Année	2	0.177	0.088	5.763	0.008

Figure 27 : Somme des carrés de type III relative à la variable « disparition »

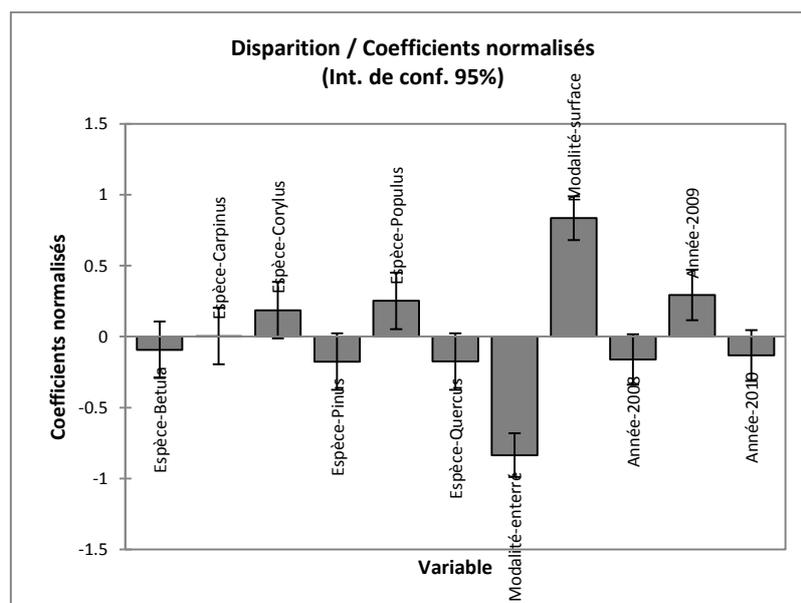


Figure 28 : Graphique des coefficients normalisés relatifs à la variable « disparition »

Le graphique des coefficients normalisés permet de visualiser le poids relatif des variables. Plus la valeur absolue d'un coefficient est élevée, plus le poids de la variable correspondante est important. Lorsque l'intervalle de confiance autour des coefficients normalisés comprend la valeur 0, le poids de la variable dans le modèle n'est pas significatif.

L'incidence majeure des modalités « surface » et « enterré » est ici clairement mise en évidence (fig. 28). Les modalités « année 2009 » et « espèce-*Populus* » ont un léger poids dans la variation du modèle comme semblait le montrer l'observation des histogrammes ; les autres modalités ne sont pas incidentes.

Une série de tests de comparaisons multiples par paires viennent compléter l'Anova (Tuckey, Bonferroni, REGWQ). Les trois tests donnent le même résultat (annexe III.1.1.1.) :

- **aucune différence significative entre les espèces**
- **les modalités « surface » et « enterré » sont toujours différenciées**
- **l'année 2009 s'individualise par rapport aux deux autres années de prélèvement**

I.3.3.2. Dispersion

Le R^2 ajusté de la régression de la variable « dispersion » est de 0.764. **Le type de dépôt est le facteur majoritaire**, mais la p-value est également significative pour le facteur année avec une valeur de F non négligeable. Le facteur espèce n'est pas incident (fig. 29).

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Espèce	5	0.071	0.014	1.821	0.142
Type de dépôt	1	0.700	0.700	89.324	< 0.0001
Année	2	0.180	0.090	11.487	0.0002

Figure 29 : Sommes des carrés de type III relatives à la variable « dispersion »

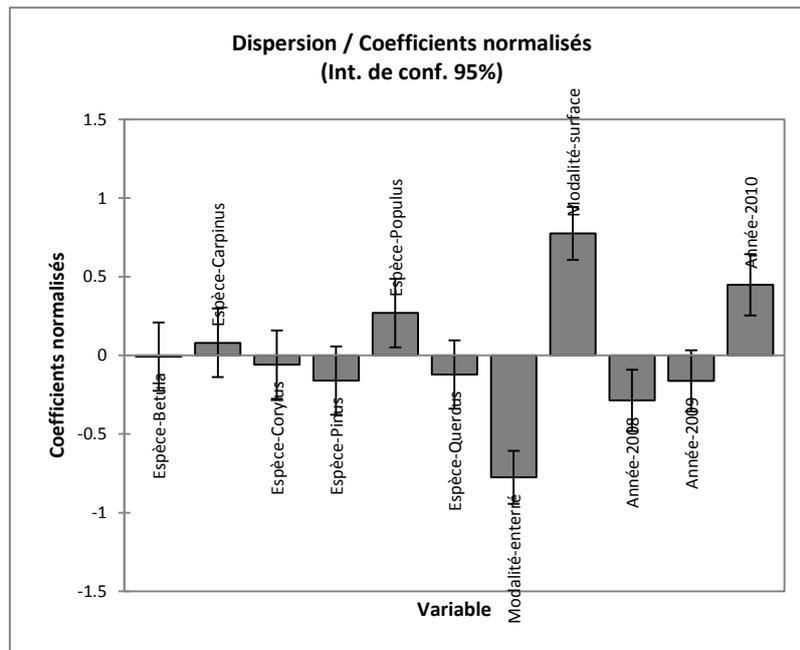


Figure 30 : Graphique des coefficients normalisés relatif à la variable « dispersion »

Les modalités « surface » et « enterré » sont opposées et ont le plus de poids dans la variation du modèle. L'année 2010 a également un poids relativement important (dispersion forte) dans l'analyse et, de manière secondaire, l'année 2008 (dispersion faible). *Populus* est le seul taxon dont le poids est significatif dans le modèle (fig. 30).

Les trois tests de comparaisons multiples par paires (Tuckey, Bonferroni, REGWQ – annexe III.1.1.2.) mettent en évidence :

- **l'absence de différences significatives entre les taxons**
- **la différenciation des modalités « surface » et « enterré »**
- **l'individualisation de l'année 2010 par rapport aux deux autres années de prélèvement**

I.3.3.3. Fragmentation

Le R^2 ajusté indique que 60.7% de la variabilité du modèle est expliquée par les paramètres choisis. **Le type de dépôt est à nouveau le facteur le plus incident** sur la variabilité de la fragmentation (fig. 31). La p-value des deux autres facteurs est également significative, mais la valeur de F est très inférieure.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Espèce	5	268.239	53.648	4.415	0.005
Type de dépôt	1	313.678	313.678	25.816	< 0.0001
Année	2	170.993	85.497	7.036	0.003

Figure 31 : Sommes des carrés de type III relatives à la variable « facteur d'augmentation du nombre de fragments »

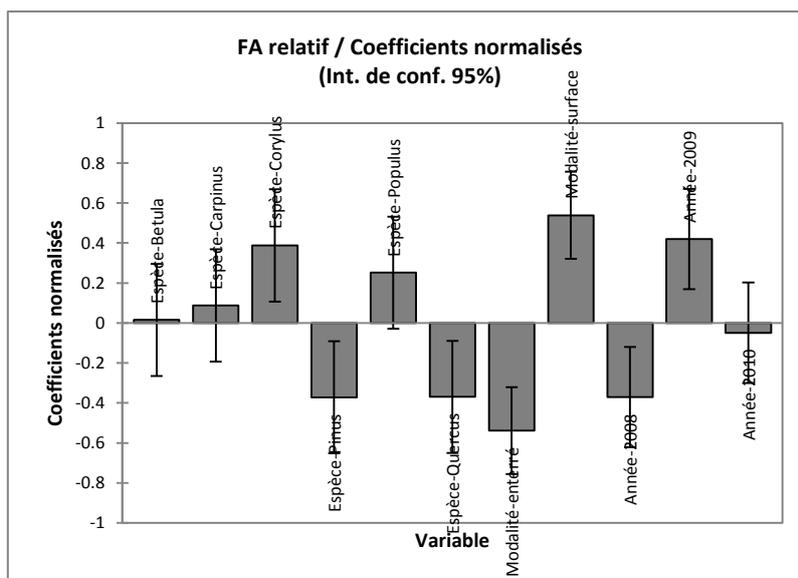


Figure 32 : Graphique des coefficients normalisés relatif à la variable « facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments »

Les modalités « surface » et « enterré » ont le poids le plus important dans la variation du modèle, mais d'autres facteurs sont incidents : les modalités 2008 (faible fragmentation) et 2009 (fragmentation forte) s'opposent, ainsi que *Pinus* et *Quercus*, qui se fragmentent significativement moins que *Corylus* (fig. 32).

Les procédures de comparaisons multiples par paires (Tuckey, Bonferroni, REGWQ) mettent en évidence des différences significatives entre les paramètres du modèle (annexe III.1.1.3.).

Les résultats des tests sont parfois légèrement différents :

- les modalités « surface » et « enterré » sont distinguées par tous les tests
- l'année 2009 s'individualise par rapport à 2008 (Tuckey et Bonferroni) ou par rapport à 2008 et 2010 (REGWQ)
- il existe des différences de fragmentation entre les taxons :

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
<i>Pinus</i>	6.029	A	
<i>Quercus</i>	6.046	A	
<i>Betula</i>	9.700	A	B
<i>Carpinus</i>	10.387	A	B
<i>Populus</i>	11.943	A	B
<i>Corylus</i>	13.235		B

Figure 33 : Différences significatives entre les moyennes des modalités établies par comparaisons multiples par paires (procédure de Tuckey et Bonferroni).

D'après les tests de Tuckey et Bonferroni, *Pinus* et *Quercus* sont significativement différents de *Corylus* (fig. 33).

Le test de REGWQ (Ryan-Einot-Gabriel-Welsch) distingue bien *Corylus*, mais également *Populus* de *Pinus* et *Quercus* (fig. 34). D'après Xlstat, ce test « est la procédure itérative la plus performante dans une majorité de situations ».

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
<i>Pinus</i>	6.029	A	
<i>Quercus</i>	6.046	A	
<i>Betula</i>	9.700	A	B
<i>Carpinus</i>	10.387	A	B
<i>Populus</i>	11.943		B
<i>Corylus</i>	13.235		B

Figure 34 : Différences significatives entre les moyennes des modalités établies par comparaisons multiples par paires (procédure de Ryan-Einot-Gabriel-Welsch)

Notons que *Corylus* présente une fragmentation élevée essentiellement dans les cellules de surface 2009 et 2010 et, dans une moindre mesure, dans la cellule enterrée 2009. Dans les autres dépôts, ce taxon ne s'éloigne pas de la moyenne. *Populus* présente des valeurs moins hautes que *Corylus* dans les dépôts où celui-ci est fortement représenté, mais sa fragmentation est toujours relativement importante, dès 2008 et quel que soit le type de dépôt. Nous pensons donc que la différence significative du comportement de ce taxon mise en évidence par la procédure REGWQ doit être prise en considération.

I.3.3.4. Fragmentation des taxons par classe de taille

L'analyse complète des cellules enterrées 2008 et 2010, incluant les classes de taille de fragments]1-2mm] et]2-4mm], nous permettent une analyse plus détaillée de la fragmentation des différents taxons.

Le nombre moyen de fragments par classe de taille toutes espèces confondues pour les deux années est de 188 dans la classe]1-2mm], 81 dans la classe]2-4mm] et 67 pour la classe >4mm (fig. 35).

Comme c'est souvent le cas, la fragmentation produit **un grand nombre de petits fragments, un peu moins de fragments de taille moyenne et un nombre encore moins important de gros fragments.**

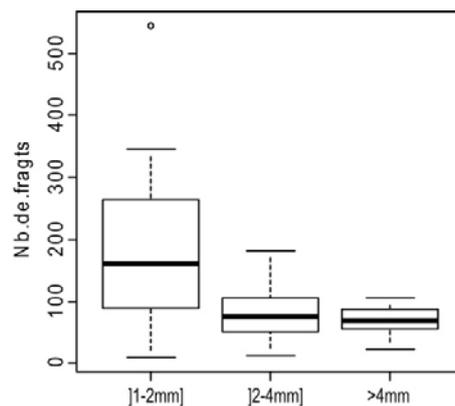


Figure 35 : Nombre de fragments moyen par classe de taille (]1-2mm],]2-4mm], >4mm)

Tous les taxons ne suivent cependant pas ce schéma général. Si la plupart des essences présentent bien un nombre de fragments qui va décroissant avec la grosseur des mailles, *Quercus* en revanche a une répartition inverse (plus de gros que de petits fragments). De même, si les autres taxons ont tous un nombre plus élevé de fragments dans la classe]1-2mm], la classe immédiatement supérieure,]2-4mm], est parfois égale ou moins bien représentée que la classe supérieure à 4mm. C'est le cas de *Carpinus*, *Pinus* et *Quercus* dans la cellule 2008 et *Betula*, *Corylus*, *Pinus* et *Quercus* dans la cellule 2010 (fig. 36).

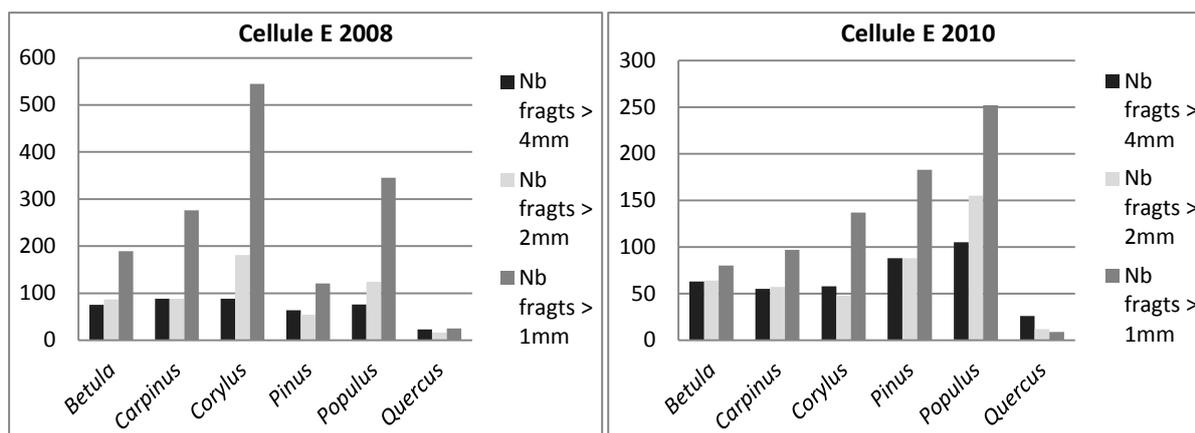


Figure 36 : Nombre de fragments par taxon et par classe de taille dans les cellules enterrées 2008 et 2010 (attention, l'échelle de ces deux histogrammes est différente – nous ne souhaitons pas observer les différences entre cellules, déjà largement discutées, mais bien la distribution des fragments entre les différentes mailles pour chaque taxon)

Les histogrammes ci-dessus se fondent sur le nombre réel de fragments retrouvés par classe de taille pour chaque taxon. Cependant, nous avons vu que le nombre total de fragment à l'issue de l'expérimentation est fortement corrélé à la masse initiale déposée – c'est-à-dire à la quantité et au volume de matière déposée –. La masse du dépôt initial dépend bien sûr de la densité des charbons de bois (dont nous avons vu qu'elle est différente en fonction des essences, cf. fig. 18 et chapitre III, § II.2.2.1.), mais aussi de la taille des fragments. Or, après la combustion, le nombre (Théry et. al, 2010b), mais aussi la taille des charbons résiduels diffèrent selon les taxons. Il en ressort, à nombre de fragments déposés égal, une grande variabilité de la masse déposée par taxon au sein des dépôts (tableau 8).

Espèces	Masse déposée E 2008 (g)	Masse déposée E 2010 (g)
<i>Betula pubescens</i>	10.11	13.62
<i>Carpinus betulus</i>	12.29	11.81
<i>Corylus avellana</i>	11.58	15.77
<i>Pinus pinaster et halepensis</i>	21.52	13.53
<i>Populus alba</i>	11.82	8.41
<i>Quercus pubescens</i>	4.00	2.65

Tableau 8 : Masse initiale déposée par taxon dans les cellules enterrées 2008 et 2010 en grammes

Qui plus est, ayant regroupé *Pinus pinaster* et *Pinus halepensis* lors de l'indentification spécifique, la masse du taxon *Pinus* correspond au dépôt de 30 fragments et non 15 comme c'est le cas pour les autres taxons.

Le nombre absolu de fragments de *Quercus* semble bien inférieur aux autres taxons. Cependant, si nous considérons la masse déposée dans les deux cellules pour ce taxon, celle-ci est bien inférieure aux autres essences. Compte tenu du lien mis en évidence entre les deux variables (masse initiale déposée/nombre total de fragments produits à l'issue de l'expérimentation ; cf. fig. 19), nous avons calculé un indice de fragmentation « déflaté » de la variation de masse (tableaux 9 et 10), à l'instar des procédés utilisés en économie ou en histoire pour se défaire des variations de l'inflation au cours du temps et rendre comparables des valeurs qui ne l'auraient pas été autrement.

Dans chaque cellule, la valeur 100 est attribuée à la moyenne de la masse déposée par taxon. Un indice de masse par taxon est ensuite calculé : la masse de chaque taxon est exprimée en pourcentage de la valeur de référence (masse déposée par taxon x 100 / masse moyenne de référence). Le nombre de fragment est ensuite « déflaté » de l'indice de masse (nombre de fragment par taxon x 100 / indice de masse de l'espèce).

Espèces	Nb frags > 4mm	Nb frags > 2mm	Nb frags > 1mm	Masse déposée	Indice masse	Indice fragt° > 4mm	Indice fragt° > 2mm	Indice fragt° > 1mm
<i>Betula</i>	63	64	80	10.110	85	74.1	75.2	94.1
<i>Carpinus</i>	55	57	97	12.286	103	53.2	55.1	93.8
<i>Corylus</i>	58	48	137	11.580	97	59.5	49.3	140.6
<i>Pinus</i>	88	88	183	21.518	181	48.6	48.6	101.1
<i>Populus</i>	105	155	252	11.82	99	105.6	155.9	253.4
<i>Quercus</i>	26	12	9	4	34	77.3	35.7	26.7

Tableau 9 : Nombre absolu de fragments par classe de taille, masse déposée, indice de masse (moyenne masse 11.89 = 100), indice de fragmentation par classe de taille et par taxon pour la cellule enterrée 2008

Espèces	Nb frags > 4mm	Nb frags > 2mm	Nb frags > 1mm	Masse déposée	Indice masse	Indice fragt° > 4mm	Indice fragt° > 2mm	Indice fragt° > 1mm
<i>Betula</i>	75	87	189	13.6	124.2	60.4	70.0	152.2
<i>Carpinus</i>	88	88	276	11.8	107.7	81.7	81.7	256.2
<i>Corylus</i>	88	181	545	15.8	143.8	61.2	125.9	378.9
<i>Pinus</i>	64	54	121	13.5	123.4	51.9	43.8	98.1
<i>Populus</i>	76	124	345	8.4	76.7	99.1	161.7	449.8
<i>Quercus</i>	23	16	25	2.7	24.2	95.2	66.2	103.4

Tableau 10 : Nombre absolu de fragments par classe de taille, masse déposée, indice de masse (moyenne masse 10.96 = 100), indice de fragmentation par classe de taille et par taxon pour la cellule enterrée 2010

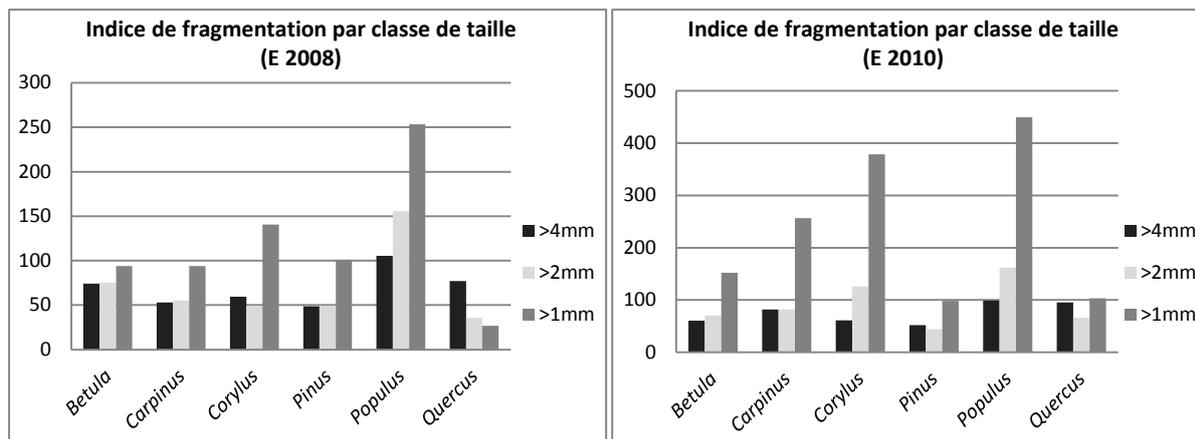


Figure 37 : Indice de fragmentation par taxon et par classe de taille dans les cellules enterrées 2008 et 2010 (attention, l'échelle de ces deux histogrammes est différente – nous ne souhaitons pas observer les différences entre cellules, déjà largement discutées, mais bien la distribution des fragments entre les différentes mailles pour chaque taxon)

Concrètement, le procédé diminue la fragmentation des essences dont la masse déposée était très largement supérieure à la moyenne, elle augmente celle dont la masse était largement inférieure. Cela tend donc à minimiser les différences entre taxons. Pour autant, **des différences restent visibles et semblent relativement constantes dans les deux cellules.** *Populus* présente une fragmentation plus importante que les autres taxons dans les deux dépôts, en particulier si l'on considère la production de petits fragments ([1-2mm]). La fragmentation de *Corylus* est relativement élevée, en particulier dans le dépôt 2010. Il produit également beaucoup de petits fragments. Inversement, l'indice de *Quercus* est bas en 2008 comme en 2010 et sa production de petits fragments diffère clairement des autres taxons. *Pinus* est également bas dans la cellule 2010 et il est plus proche de la moyenne dans la cellule 2008 (fig. 37).

Au vu de la nature des données que nous souhaitons analyser et de la faiblesse des effectifs (n=6 par taxon), seul un test non paramétrique est utilisable. Le test de Kruskal Wallis permet de déterminer si tous les échantillons appartiennent ou non à la même population ; il montre que **les différences observées entre les taxons sont significatives au seuil alpha 0.05** (fig. 38).

K	12.204
p-value (bilatérale)	0.022
alpha	0.05

Figure 38 : Résultat du test non paramétrique de Kruskal Wallis concernant les différences de fragmentation entre les taxons

Le test est complété par la procédure de Dunn (comparaisons multiples par paires. Test bilatéral) permettant de visualiser les échantillons dont la somme et la moyenne des rangs s'écartent significativement de la moyenne. D'après ce test, ***Pinus* et *Quercus* se distinguent significativement de *Populus*** (fig. 39).

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes	
<i>Pinus</i>	6	67.000	11.167	A	
<i>Quercus</i>	6	81.000	13.500	A	
<i>Betula</i>	6	107.000	17.833	A	B
<i>Carpinus</i>	6	108.000	18.000	A	B
<i>Corylus</i>	6	120.000	20.000	A	B
<i>Populus</i>	6	183.000	30.500	B	

Figure 39 : Comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Dunn / Test bilatéral

Ainsi, même après atténuation de la variation liée aux différences de masse déposée, les taxons présentent des comportements de fragmentation différents : *Pinus* et *Quercus* produisent significativement moins de fragments que la moyenne des taxons et *Populus* en produit plus.

Les différences observées ici se fondent sur le nombre de fragments de chaque classe de taille. Cela revient à analyser le nombre total de fragments par espèce. Or, si l'on considère la répartition par classe de taille, il semble que la variation soit **principalement due à la quantité de petits fragments produits ([1-2mm])**. Il n'est pas possible de tester statistiquement la variabilité de la classe de taille [1-2mm] attendu que l'information n'est disponible que dans deux cellules expérimentales ; les effectifs seraient alors vraiment trop réduits. Cependant, l'observation des histogrammes (figure 36) met assez en évidence la grande variabilité de fragmentation dans cette classe dont la représentation passe de moins de 50 à plus de 500 fragments selon les taxons. À l'inverse, si l'on se fonde sur le nombre absolu de fragments de la classe de taille >4mm, les différences entre taxons sont alors grandement réduites, en particulier dans les cellules de surface (figure 40). Les différences entre taxons sont encore amoindries si l'on se fonde sur les indices de fragmentation « déflatés » de la variation de masse (figure 41).

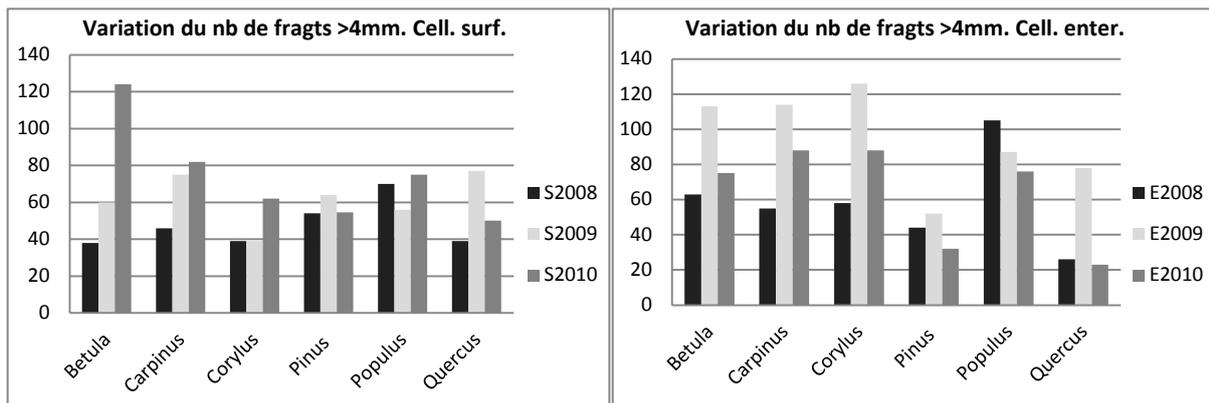


Figure 40 : Nombre absolu de fragments >4mm par taxon et par année dans les deux types de dépôts (le nombre de fragments de Pinus, qui correspond à deux espèces –halepensis et pinaster– et donc au double de fragments initialement déposés a été divisé par 2)

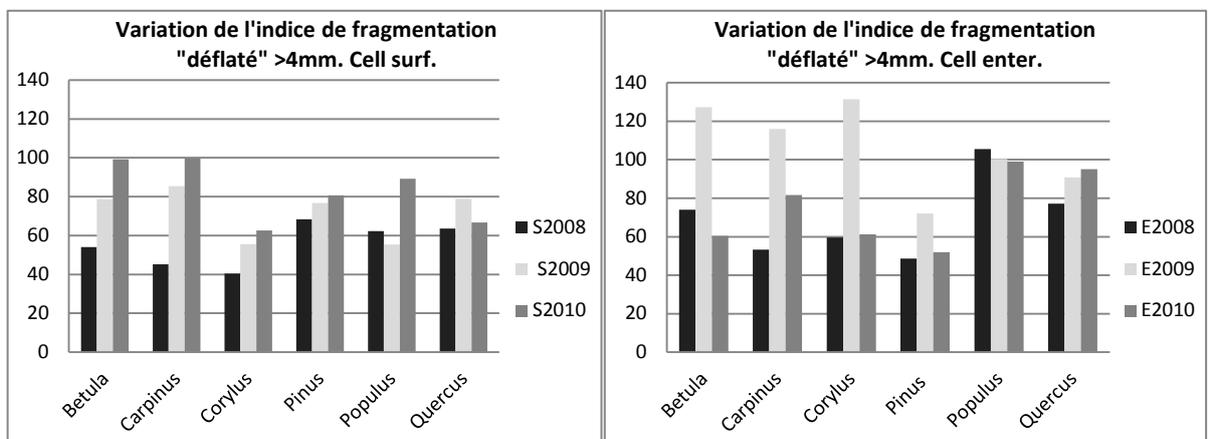


Figure 41 : Indice de fragmentation >4mm « déflaté » de la variation de masse, par taxon et par année dans les deux types de dépôts

L'information sur la fragmentation de la classe >4mm étant disponible pour toutes les cellules, nos effectifs, bien qu'étant toujours réduits (n=6), permettent de mettre en œuvre le test non paramétrique de Kruskal-Wallis. Réalisés sur l'une et l'autre des variables (nombre de fragment brut et indice de fragmentation déflaté), ceux-ci **ne mettent pas en évidence de différences significatives entre les taxons** (figure 42). Dans les deux cas, la p-value n'est pas significative au seuil alpha 0.05.

Nb. Frags. >4mm		Indice de fragmentation >4mm	
K	8.676	K	4.685
p-value (bilatérale)	0.119	p-value (bilatérale)	0.473
alpha	0.05	alpha	0.05

Figure 42 : Résultats des tests de Kruskal Wallis relatifs aux variables « nombre de fragments >4mm » et « indice de fragmentation déflaté >4mm ».

En termes de nombre de fragments, **la classe >4mm est donc homogène entre les taxons sur le plan statistique**. Ainsi, comme lors des tests de compression mécanique, la variabilité inter-spécifique est moins importante si l'on ne considère que les gros fragments.

I.4. Synthèse et discussion

Cette première expérimentation était destinée à tester les effets des processus périglaciaires sur les charbons de bois en contexte naturel. Elle a permis de mettre en évidence :

- ✓ une évolution beaucoup plus rapide des dépôts extérieurs par rapport à ceux placés à l'intérieur de la cavité. Ce constat indique que la **plus grande stabilité thermique et la réduction des processus météoriques dans les grottes peuvent avoir un effet positif sur la conservation des charbons de bois**.

Toutefois, les meilleures conditions de conservation à l'intérieur de la cavité observées ici ne sont pas généralisables à tous les contextes archéologiques. Dans notre expérimentation, la très faible – voire la quasi absence – de sédimentation sur les versants est un facteur d'altération des dépôts.

- ✓ le taux de disparition du matériel est beaucoup plus important lorsque les charbons de bois sont déposés en surface (par opposition aux dépôts enfouis). Les pertes sont relativement rapides puisque plus de la moitié du matériel initialement déposé n'est plus retrouvé après seulement une année d'exposition. Inversement, les charbons enfouis, recouverts par seulement 5cm de sédiments, sont mieux préservés et se fragmentent moins. Cela met en évidence **l'importance fondamentale de la vitesse de sédimentation pour la préservation du matériel**.
- ✓ en revanche, un phénomène de cryoexpulsion des plus gros fragments a pu être mis en évidence lorsque les charbons étaient enfouis. S'il semble effectif lorsque la couche de sédiment est encore peu épaisse (5cm), il serait utile de tester à l'avenir la possibilité de remontée des charbons de bois sur des hauteurs plus importantes. Cela

pourrait avoir des implications importantes sur le plan archéologique. Le constat de la **circulation verticale** des charbons de bois en contexte périglaciaire invite quoi qu'il en soit à la prudence vis-à-vis du choix des échantillons notamment lorsqu'ils sont destinés à la **datation** de niveaux dans lesquels l'activité du gel est identifiée.

- ✓ la fragmentation des charbons de bois est importante, passant de 105 fragments par cellule à plusieurs milliers au bout de quatre ans de dépôt seulement en contexte naturel. La rapidité de la perte de matériel dans les cellules de surface et de la fragmentation des échantillons quel que soit le type de dépôt laisse envisager les effets extrêmement destructeurs d'une exposition prolongée du matériel anthracologique dans des conditions sans doute plus rudes que celles de l'étage périglaciaire pyrénéen actuel. La **rapidité et l'intensité de la fragmentation** montre bien que les processus mécaniques peuvent avoir une incidence majeure sur la dégradation du matériel anthracologique et qu'une **quasi disparition des charbons de bois par hyper-fragmentation est envisageable**.

- ✓ **les phénomènes de dispersion et de perte n'affectent pas les taxons de manière différentielle**. Ils sont essentiellement liés au transport par le vent et les ruissellements et dans une moindre mesure à l'avancée des fronts des coulées de solifluxion et à la cryoreptation. Ces processus affectent donc tous les taxons de manière relativement homogène et ne sont pas à même dans notre expérimentation de générer une conservation différentielle des essences. Celle-ci est donc majoritairement le fruit, si elle existe, de l'hétérogénéité de la fragmentation. Ceci met en évidence l'importance de continuer à étudier les modalités de fragmentation des essences.

- ✓ dans cet essai, *Pinus* et *Quercus* produisent moins de fragments que la moyenne des essences et *Populus* et plus ponctuellement *Corylus* en produisent plus. Toutefois, ces **différences sont principalement marquées dans les classes de taille inférieures, elles ne sont plus distinguées statistiquement si l'on ne prend en considération que**

la classe >4mm. L'étude de la fragmentation doit donc inclure la question de la représentativité paléoenvironnementale en fonction de la taille des fragments.

Dans cette expérimentation, les alternances gel-dégel ont évidemment une incidence, toutefois les effets observés, relativement importants en comparaison d'un nombre de cycles gel-dégel réduit (25 à 50 en surface et 6 à 20 à 10cm de profondeur), sont également le fruit des processus liés : le vent froid et fort ainsi que les ruissellements de fonte du couvert neigeux ou consécutifs aux épisodes orageux contribuent à disperser et fragmenter les charbons de bois. Lorsque la neige est absente et même sans l'activité du gel, l'imbibition et la dessiccation régulière (journalière ?) des fragments doit probablement participer du processus de fragmentation. De même, la végétation, certes fort réduite, est malgré tout présente et les racines viennent en partie se nourrir des nutriments contenus dans les charbons de bois. Il est clair que dans le cadre de cette expérimentation en contexte naturel, il est difficile de faire la part réelle, isolée, du rôle des alternances gel-dégel. En contrepartie, le protocole mis en place permet justement de mettre en évidence l'importance et la rapidité d'action des processus météoriques combinés. Le rôle amplificateur des processus « secondaires », et en particulier du vent, a été constaté au cours d'autres expérimentations visant par exemple à mesurer les déplacements d'alignements de pièces de silex (notamment Hilton, 2003).

Toutefois, si l'on veut mesurer réellement la réaction particulière des charbons de bois aux alternance de gel et dégel du sédiment encaissant, cela ne peut être fait qu'en conditions contrôlées où un phénomène peut être mis en œuvre seul et observé.

Pour cette raison, nous avons réalisé une seconde expérimentation, à même de documenter spécifiquement les effets du gel-dégel.

IV. EXPÉRIMENTATION IN VITRO : MESURE DES EFFETS DES ALTERNANCES DE GEL ET DÉGEL DU SÉDIMENT SUR LES CHARBONS DE BOIS

Introduction

Cette seconde expérimentation permet à la fois d'isoler le processus d'alternance gel-dégel et d'en mesurer les effets sur les charbons de bois, mais aussi d'en accélérer le rythme par rapport à sa réalité en milieu naturel.

Dans cette expérience, les charbons de bois de douze taxons sains et deux taxons altérés sont placés dans une matrice sédimentaire limono-argileuse saturée en eau. Le dispositif expérimental est soumis à 400 alternances gel-dégel, ce qui représente l'équivalent de 8 à 20 années de dépôt en milieu périglaciaire actuel sous nos latitudes. La température de gel est de -15°C, correspondant à celle atteinte au cours des phases froides du dernier cycle glaciaire. Le sédiment imbibé d'eau, et principalement composé de limon et d'argile, est extrêmement plastique et gélif et les pressions générées sur le matériel anthracologique sont donc importantes.

II.1. Protocole expérimental

II.1.1. Échantillons expérimentaux

Douze espèces de feuillus et de conifères fréquemment retrouvées en contexte archéologique sont testées dans le cadre de cette expérience : *Acer pseudoplatanus*, *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Juniperus oxycedrus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Populus alba*, *Quercus pedunculata* et *Quercus pubescens*. Deux de ces essences sont intégrées à l'expérience dans un état de dégradation avancé : le bouleau (*Betula pubescens*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*).

Les fragments de charbons utilisés sont issus de combustions en foyer ouvert dont le déroulement est décrit au chapitre II.

Deux lots d'échantillons expérimentaux sont constitués. Ils comprennent chacun trois fragments de chaque taxon ($n = 2 \text{ lots} \times 3 \text{ charbons} \times 12 \text{ taxons} + 2 \text{ altérés} = 84$). Des boîtes plastiques (« boîtes L.A.B. » Caubère ; 130 x 90 x 25cm) nous ont servi de contenant. Deux compartiments confectionnés en grillage fin (maille inférieure à 1mm) divisent l'espace interne en deux et sont destinés à recevoir les charbons de bois. Chaque boîte contient donc deux lots séparés d'une même essence, soit six fragments. Les compartiments en grillage fin permettent à la fois que les deux lots ne se mélangent pas, mais aussi une récupération simple des fragments à l'issue de l'expérimentation sans risques de refragmentation liés au démontage.

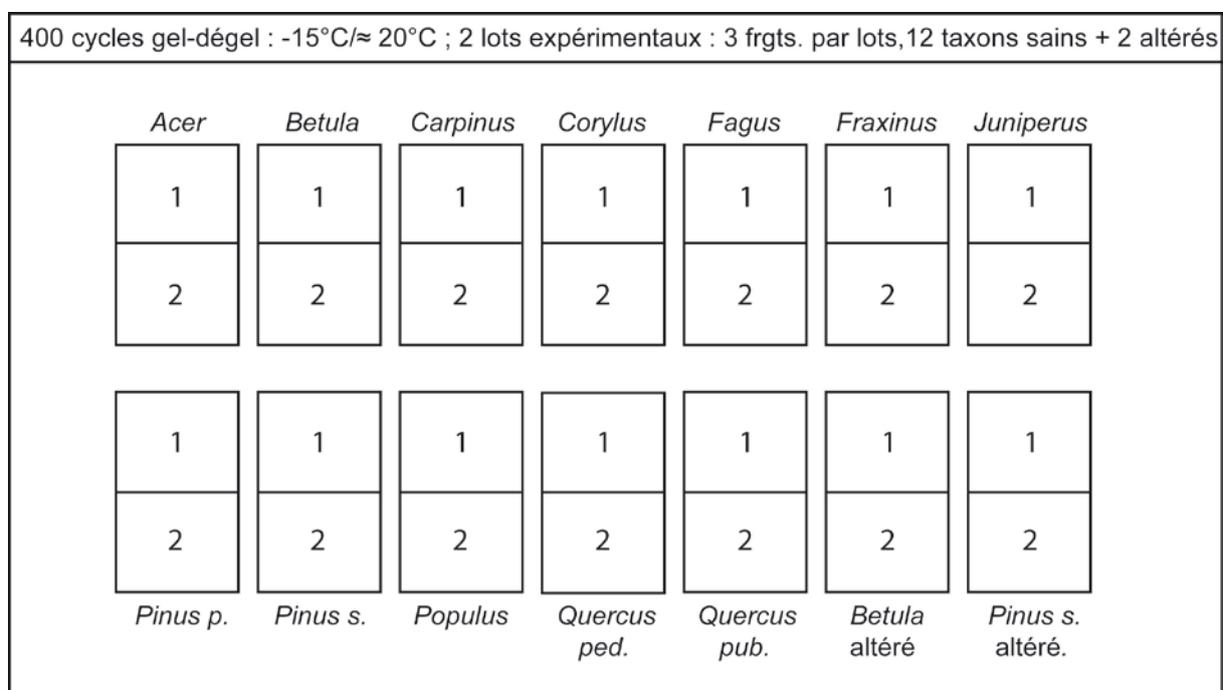


Figure 43 : Protocole expérimental mis en place pour tester les effets des alternances gel-dégel. Les fragments de charbon sont inclus dans une matrice sédimentaire limono-argileuse.

II.1.2. Sédiment encaissant

Les boîtes sont remplies de sédiment imbibé d'eau afin de tester les effets conjugués du gel-dégel des fragments de charbon eux-mêmes et des pressions externes exercées par le gonflement et la rétractation du sédiment lors des phases de gel et de dégel. Le sédiment utilisé provient de marnes pliocènes de Cagnes-sur-Mer, dans le quartier des Vallières (Pliocène inférieur *in situ* au moins 200m d'épaisseur). Le sédiment a été tamisé à la maille

1mm afin d'éliminer les particules grossières et les éventuels restes végétaux. La teneur en carbonates, sables, argiles et limons a été mesurée par Michel Dubar (Cepam-CNRS) à l'issue de cette première phase de traitement. Le sédiment est principalement composé de limons (78.88%) et d'argiles (20.5%) (tableau 11). Trois quarts de litres d'eau ont été mélangés à 1.5 litres de sédiment sec jusqu'à obtenir une préparation visqueuse homogène qui a servi à remplir les boîtes. Les charbons sont donc inclus au départ de l'expérimentation dans un sédiment fin et saturé en eau.

Ca CO3	Sables (>50 microns)	Limons (2-50μ)	Argile (>2 microns)
7,82	0,80	70,88	20,5

Tableau 11 : Teneur en carbonates, sables, limons et argiles du sédiment utilisé dans les cellules expérimentales (mesures : caCO3 : calcimètre de Bernard ; sables : tamisage ; argiles : pipette d'Andreasen ; limons par différence)

L'argile est majoritaire composée de smectites (environ huit dixième), de l'illite et un peu de chlorite ou kaolinite (Dubar, communication écrite). Les propriétés mécaniques du sédiment sont déterminées par la forte composante argileuse et en particulier par les smectites dont le pouvoir gonflant est bien connu. Le sédiment utilisé se caractérise donc par une grande plasticité. Par ailleurs, la finesse des particules et le fort taux d'hygrométrie lui confère une conductivité thermique élevée, propice à la diffusion des ondes de gel.

II.1.3. Cycles gel-dégel

Un premier test de congélation a montré que des cycles de gel et de dégel de 24 heures sont suffisants pour que la matière contenue dans les boîtes gèle et dégèle entièrement. Les boîtes sont consolidées à l'aide d'adhésif élastique (chatterton) afin d'éviter que les pressions internes n'endommagent les contenants plastiques. Les boîtes sont placées en congélateur classique (domestique) ; la température est réglée à -15°C, correspondant à un gel intense. Il faut noter que le gel comme le dégel des boîtes et de leur contenu se produit plus brutalement qu'en conditions naturelles, bien que la présence de sédiment atténue les chocs thermiques subis par le matériel. Le dispositif expérimental est soumis à 400 cycles de 48h.

II.1.4. Tamisage, pesée et décompte des fragments

À l'issue de l'expérimentation, les boîtes sont ouvertes et photographiées. Des fentes de dessiccation et de petits polygones plus ou moins réguliers liés aux cycles gel-dégel sont visibles. Le taux d'humidité atteint le maximum mesuré par la sonde utilisée ; il est encore supérieur à 30%. Une intense fragmentation de certains fragments est visible.

Les compartiments permettent de séparer délicatement les deux lots qui sont tamisés à l'eau sur une colonne de tamis]0.5-1mm],]1-2mm],]2-4mm] et > 4mm. Les charbons de bois sont séchés à l'air à température ambiante puis chaque fraction est pesée. Le décompte des fragments par classe de taille est fait manuellement ou par analyse d'image (macro ImageJ, cf. chapitre II, § II.1.) selon l'intensité de la fragmentation.

II.2. Présentation des résultats

II.2.1. Fragmentation des charbons de bois dans les deux lots d'échantillons expérimentaux : observations générales

Un décompte des fragments de chaque classe de taille est effectué à l'issue des 400 cycles gel-dégel (tableaux 12 et 13). On observe d'emblée une **grande variabilité de la quantité de fragments produits selon les taxons**. Si l'on se fonde sur le total des fragments >1mm (c'est-à-dire sans tenir compte de la fraction]0.5-1mm]), le nombre de fragments produits passe de 10 pour *Pinus pinaster* à 572 pour *Quercus pubescens* dans le premier lot. Dans le second lot, *Populus* produit seulement 15 fragments quand *Quercus pubescens* en produit 500.

Sachant que chaque lot contenait seulement 3 fragments de chaque taxon au départ de l'expérience, le nombre de fragments de *Quercus pubescens* est multiplié par 190.7 dans le premier lot et par 166.7 dans le second. Inversement, le nombre de fragments de *Pinus pinaster* est seulement 3.3 fois plus important qu'au départ dans le premier lot et *Populus* présente 5 fois plus de fragments dans le second.

Taxon	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total frags.	total >1mm	total frags. déposés	Facteur d'augment°
<i>Acer</i>	172	184	13	17	386	214	3	71.3
<i>Betula</i>	45	26	4	6	81	36	3	12.0
<i>Carpinus</i>	122	164	11	9	306	184	3	61.3
<i>Corylus</i>	161	140	6	15	322	161	3	53.7
<i>Fagus</i>	274	313	12	5	604	330	3	110.0
<i>Fraxinus</i>	53	52	22	15	142	89	3	29.7
<i>Juniperus</i>	89	59	17	14	179	90	3	30.0
<i>Pinus pinast.</i>	16	3	2	5	26	10	3	3.3
<i>Pinus sylv.</i>	138	91	11	13	253	115	3	38.3
<i>Populus</i>	27	22	1	8	58	31	3	10.3
<i>Quercus ped.</i>	267	154	10	16	447	180	3	60.0
<i>Quercus pub.</i>	433	478	52	42	1005	572	3	190.7
<i>Betula alt.</i>	27	26	1	10	64	37	3	12.3
<i>Pinus sylv. alt.</i>	62	51	5	9	127	65	3	21.7

Tableau 12 : Nombre de fragments par classe de taille dans le lot 1

Taxon	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total frags.	total >1mm	total frags. déposés	Facteur d'augment°
<i>Acer</i>	37	44	9	12	102	65	3	21.7
<i>Betula</i>	78	79	5	10	172	94	3	31.3
<i>Carpinus</i>	132	106	7	15	260	128	3	42.7
<i>Corylus</i>	128	320	18	10	476	348	3	116.0
<i>Fagus</i>	108	151	7	8	274	166	3	55.3
<i>Fraxinus</i>	20	33	1	5	59	39	3	13.0
<i>Juniperus</i>	72	41	6	7	126	54	3	18.0
<i>Pinus pinast.</i>	48	29	0	3	80	32	3	10.7
<i>Pinus sylv.</i>	81	76	6	15	178	97	3	32.3
<i>Populus</i>	29	7	1	7	44	15	3	5.0
<i>Quercus ped.</i>	135	144	17	14	310	175	3	58.3
<i>Quercus pub.</i>	311	465	16	19	811	500	3	166.7
<i>Betula alt.</i>	28	14	4	6	52	24	3	8.0
<i>Pinus sylv. alt.</i>	30	36	3	8	77	47	3	15.7

Tableau 13 : Nombre de fragments par classe de taille dans le lot 2

L'écart de fragmentation entre les espèces les plus et les moins fragmentées est donc considérable. Cet écart est encore plus important si l'on prend également en considération la classe de taille]0.5-1mm] ; on passe alors de 26 à 1005 fragments dans le lot 1 et de 44 à 811 fragments dans le lot 2. Certaines espèces ne se sont donc quasiment pas fragmentées quand d'autres le sont dans des proportions très importantes.

On note que l'espèce la plus fragmentée (*Quercus pubescens*) est la même dans les deux lots. En revanche, l'espèce la moins fragmentée n'est pas identique. Toutefois, *Pinus pinaster* ne compte que 32 fragments dans le lot 2 et *Populus* seulement 31 dans le lot 1. Il semble donc qu'il y ait une relative constance de fragmentation des taxons dans les deux lots expérimentaux. Si la fragmentation des taxons est homogène d'un lot à l'autre, on peut alors supposer qu'il ne s'agit pas d'un phénomène aléatoire, mais d'une propriété du taxon lui-même.

Il est donc nécessaire de vérifier si les disparités observées entre taxon sont reproductibles d'un échantillon à l'autre.

II.2.2. Homogénéité de la fragmentation dans les deux lots d'échantillons expérimentaux

La fragmentation des taxons dans les deux lots d'échantillons n'est pas strictement identique et l'on note bien quelques différences d'un lot à l'autre. Celles-ci sont principalement marquées dans le cas d'*Acer*, *Corylus* et *Fagus*. Hormis ces trois taxons, la fragmentation dans les deux lots est assez proche (fig. 44).

Le **test de Levene** indique que la variance des deux séries (nombre de fragments >1mm) est **homogène**. De même, le test de **Mann-Whitney** indique que la distribution des deux séries est **statistiquement identique** (au seuil alpha 0.05).

Les deux lots de charbons présentent donc globalement un comportement similaire. Si l'on considère le nombre de fragments par classe de taille pour chaque taxon, les deux lots expérimentaux montrent une plus grande variabilité (fig. 46 à 49). La fragmentation, lorsqu'elle est différente entre les deux séries, est souvent plus importante dans le lot 1. Toutefois, les tests pratiqués sur les séries de chaque classe de taille de fragment ne montrent pas non plus de différences significatives (annexe III.2.1.). Quelle que soit la classe de taille considérée, la fragmentation des taxons est statistiquement homogène d'un lot à l'autre. La fragmentation des taxons doit dès lors être étudiée afin de mesurer les variations de la réaction des essences aux conditions expérimentales.

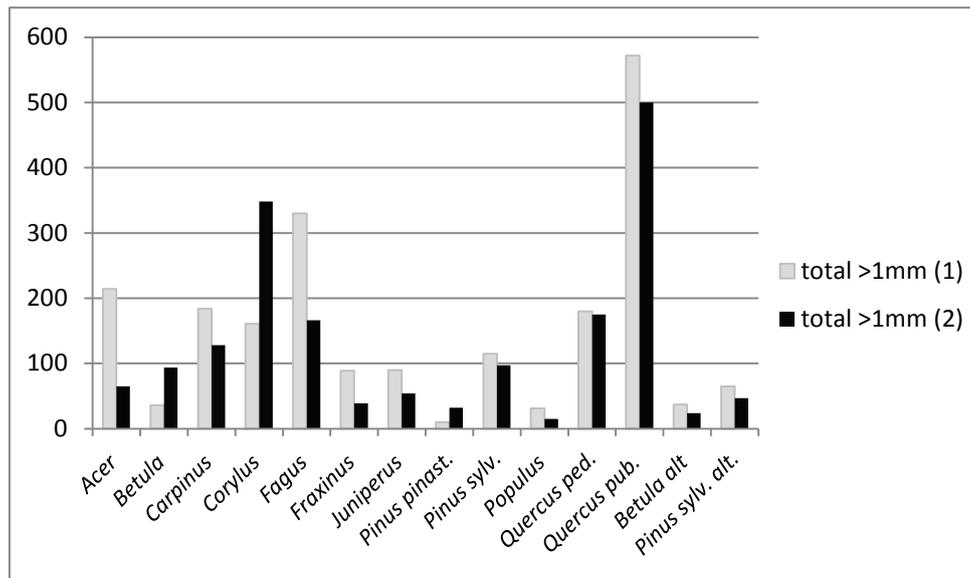


Figure 44 : Nombre total de fragments >1mm dans les deux lots expérimentaux

II.2.3. Analyse statistique de la fragmentation

Distribution des fragments par classe de taille

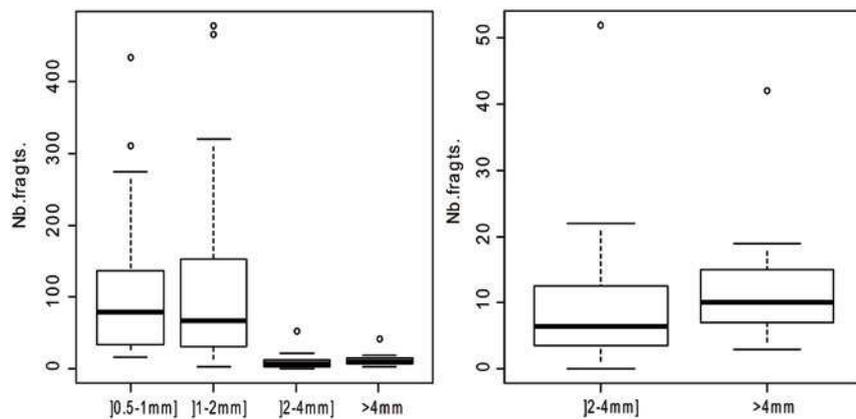


Figure 45 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille tous taxons et lots confondus, a) toutes classes de taille, b) classes de taille supérieures]2-4mm], >4mm

Statistiques descriptives	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm
Minimum	16	3	0	3
Maximum	433	478	52	42
Moyenne	111.5	118.1	9.5	11.5
Médiane	79.5	67.5	6.5	10.0
Écart-type (n)	99.7	126.9	10.1	7.2
Coefficient de variation	0.894	1.074	1.056	0.625

Tableau 14 : Statistiques descriptives de la fragmentation par classes de taille de fragments tous taxons et lots confondus

Tous taxons confondus, la classe]0.5-1mm] compte en moyenne 111.5 fragments et la classe]1-2mm] en comprend 118.1. Dans les deux classes de taille supérieure, le nombre moyen de fragments est beaucoup moins élevé, il est de 9.5 dans la classe]2-4mm] et de 11.5 dans la classe >4mm. Le nombre de fragments n'est donc pas inversement proportionnel à la classe de taille comme cela a pu être mis en évidence dans d'autres expériences. En particulier, la moyenne comme la médiane de la classe >4mm sont supérieures à celles de la classe]2-4mm].

Selon les taxons, le nombre de fragments oscille entre 16 et 433 dans la classe]0.5-1mm], entre 3 et 478 dans la classe]1-2mm], entre 0 et 52 dans la classe]2-4mm] et entre 3 et 42 dans la classe >4mm (tableau 14). La classe]1-2mm] est celle dans laquelle la variabilité est la plus importante, inversement, la plus réduite concerne la classe >4mm (fig. 45 et tableau 14).

- *Nombre de fragments par classe de taille : différences taxonomiques*

Dans les quatre classes de taille, *Quercus pubescens* se démarque des autres taxons par un nombre de fragments plus important (fig. 46 à 49). *Quercus pedunculata*, *Fagus*, *Corylus*, *Carpinus* et dans une moindre mesure *Pinus sylvestris* et *Acer* présentent un nombre de fragment plus élevé que le reste des taxons dans les deux premières classes de taille (]0.5-1mm],]1-2mm]) (fig. 46 et 47). Dans les deux classes de taille supérieures (]2-4mm], >4mm), la variabilité est moins importante entre les taxons. Les taxons dont la fragmentation est élevée dans les classes inférieures sont également mieux représentés dans les classes supérieures, de même que *Fraxinus* et *Juniperus* dans le lot 1 (fig. 48 et 49).

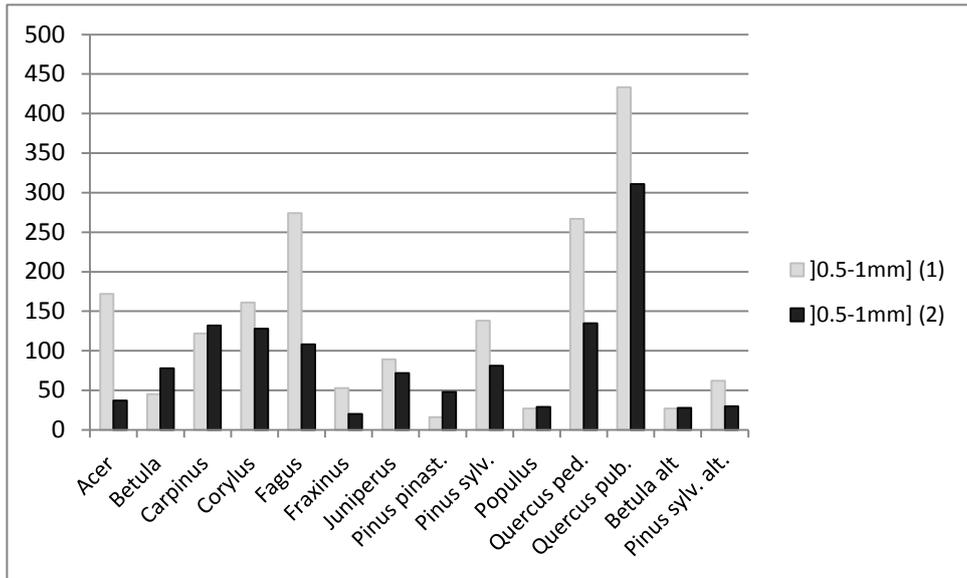


Figure 46 : Nombre de fragments compris entre 0.5 et 1mm dans les deux lots expérimentaux

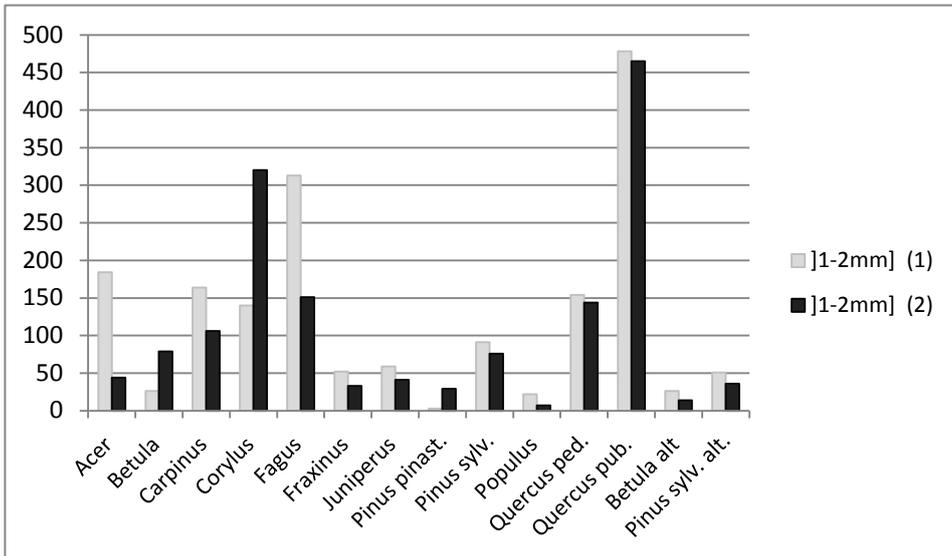


Figure 47 : Nombre de fragments compris entre 1 et 2mm dans les deux lots expérimentaux

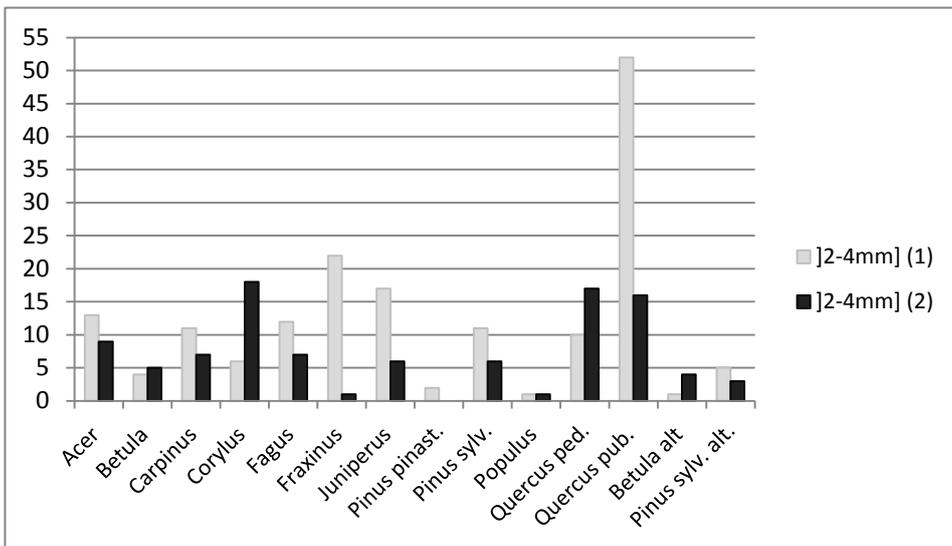


Figure 48 : Nombre de fragments compris entre 2 et 4mm dans les deux lots expérimentaux

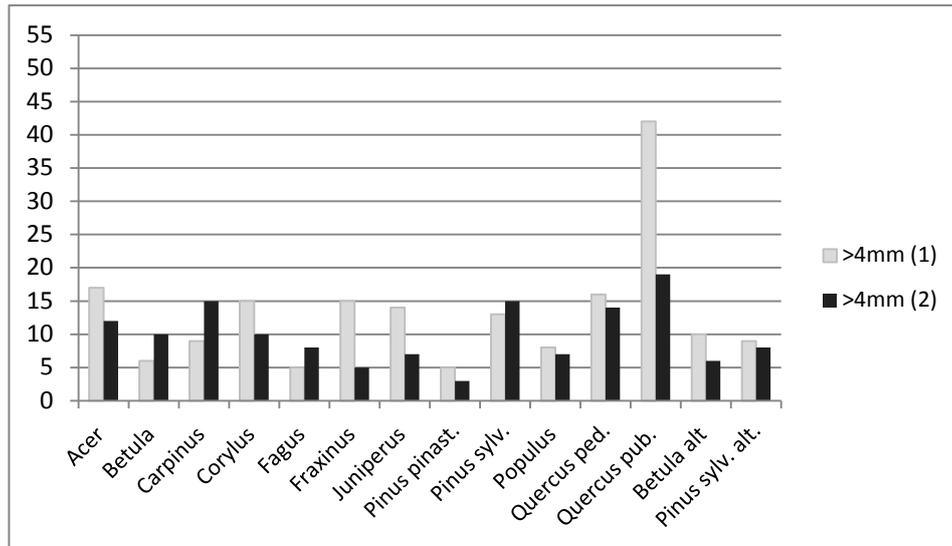


Figure 49 : Nombre de fragments >4mm dans les deux lots expérimentaux

L'observation des histogrammes du nombre de fragments par taxon et par classe de taille semble donc indiquer que les espèces présentent des différences de fragmentation. Afin de vérifier si ces différences sont statistiquement significatives, nous avons pratiqué un test non-paramétrique de Kruskal-Walis (fig. 50) sur les huit valeurs à notre disposition par taxon ($n = \text{nombre de fragment} \times 4 \text{ classe de taille} \times 2 \text{ lots} = 8$). **Le test indique que les échantillons proviennent de populations différentes** (au seuil alpha 0.05, $p\text{-value} = 0.011$). Cependant, les procédures de comparaisons multiples par paires (fig. 51) ne distinguent qu'**une seule paire significativement différente** ; il s'agit de *Pinus pinaster* et *Quercus pubescens*, dont nous avons vu qu'ils constituent les deux extrêmes en termes de nombre de fragments dans le premier lot de charbons (§ II.2.1.).

K	26.003
p-value (bilatérale)	0.011
alpha	0.05

Figure 50 : Test de Kruskal-Walis sur le nombre de fragments par classe de taille et par taxon ; au seuil alpha 0.05, les taxons présentent des différences significatives de fragmentation

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes	
<i>Pinus pinaster</i>	8	230.500	28.813	A	
<i>Populus</i>	8	272.500	34.063	A	B
<i>Betula alt.</i>	8	301.500	37.688	A	B
<i>Pinus sylv. alt.</i>	8	378.000	47.250	A	B
<i>Betula</i>	8	385.500	48.188	A	B
<i>Fraxinus</i>	8	410.000	51.250	A	B
<i>Juniperus</i>	8	465.000	58.125	A	B
<i>Pinus sylvestris</i>	8	501.500	62.688	A	B
<i>Fagus</i>	8	509.500	63.688	A	B
<i>Acer</i>	8	518.000	64.750	A	B
<i>Carpinus</i>	8	518.000	64.750	A	B
<i>Corylus</i>	8	557.000	69.625	A	B
<i>Quercus pedunculata</i>	8	581.500	72.688	A	B
<i>Quercus pubescens</i>	8	699.500	87.438		B

Figure 51 : Comparaisons multiples par paires (procédure de Dunn, test bilatéral ; Seuil de significativité corrigée de Bonferroni = 0.0005)

Le test ne permet donc pas de différencier statistiquement les autres taxons. Pourtant l'observation des données brutes comme des histogrammes (fig. 44 et 46 à 49) nous semble permettre une plus grande finesse d'analyse. Comme évoqué au chapitre II, il est possible que la correction de Bonferroni masque en partie les différences entre taxon (erreur de deuxième espèce).

- *Classement des taxons en fonction du nombre de fragments produits dans les classes de taille inférieures ([0.5-1mm], [1-2mm]) et supérieures ([2-4mm], >4mm)*

L'étude de la répartition du nombre de fragments par classe de taille peut apporter des informations sur le « mode fragmentation » des taxons. *A priori*, les taxons qui produisent beaucoup de gros fragments subissent une fragmentation importante dans la masse du charbon, inversement, ceux qui produisent quantité de petits fragments sont plutôt sujets à un effritement depuis la périphérie du charbon.

Afin de mettre en évidence d'éventuelles affinités ou divergences de comportement entre les taxons et d'étudier plus précisément leur mode de fragmentation, nous avons réalisé deux classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) des taxons, l'une à partir du nombre de

petits fragments (classes]0.5-1mm] et]1-2mm]), l'autre à partir du nombre de gros fragments (]2-4mm] et >4mm).

Les dissimilarités observées sont fondées sur les distances euclidiennes et la méthode d'agrégation est celle de Ward, c'est-à-dire que les groupes sont agrégés de manière à minimiser l'inertie intra-classe et maximiser l'inertie inter-classe. Dans les deux classifications, l'inertie intra-classe se situe entre 13.13 et 13.14% et l'inertie inter-classe entre 86.6 et 86.7%.

La très faible inertie intra-classe est d'ailleurs visible au profil « ramassé » des deux dendrogrammes. Il y a donc très peu de variabilité à l'intérieur des groupes de taxons mis en évidence par les classifications. L'inertie inter-classe clairement dominante dans les deux cas correspond à la séparation de *Quercus pubescens* du reste des taxons. La plus forte dissimilarité observée quelle que soit la taille des fragments concerne *Quercus pubescens* et *Pinus pinaster* (fig. 52 et 55) ainsi que l'avait déjà mis en évidence la procédure de comparaisons multiples par paires. Cependant, des agrégations secondaires sont constituées.

Trois groupes de taxons s'individualisent dans les deux classifications (fig. 52 – 53 et 55 – 56) en fonction du nombre plus ou moins important de petits et de gros fragments qu'ils produisent. Les profils des groupes permettent de visualiser le nombre moyen de fragments pour chacune des agrégations effectuées par la procédure de classification. La troncature des dendrogrammes est réalisée manuellement de manière à ce que les groupes mis en évidence soient clairement distincts (les courbes des figures 54 et 57 ne se recoupent pas).

Concernant les petits fragments, *Quercus pubescens* constitue à lui seul le groupe le plus haut (groupe 3 ; fig. 53 et 54). L'inertie entre ce groupe et les deux autres est largement dominante (fig. 52). *Corylus*, *Fagus*, *Quercus pedunculata* d'une part, et *Acer*, *Pinus sylvestris* et *Carpinus* d'autre part, forment le groupe 1 (fig. 53), dont la fragmentation est moins élevée que *Quercus pubescens*, mais plus que tous les autres taxons (fig. 54). Ceux-ci (*Betula*, *Pinus pinaster*, *Populus*, *Pinus sylvestris* altéré, *Betula* altéré, *Fraxinus* et *Juniperus*) forment le groupe 2 (fig. 53), dont la fragmentation dans les deux classes de taille inférieures (]0.5-1mm],]1-2mm]) est la plus réduite (fig. 54). L'inertie à l'intérieur de cette dernière catégorie est très faible (fig. 52), les taxons sont peu différenciés.

Pour les gros fragments, *Quercus pubescens* est toujours isolé du reste des taxons (fig. 55) et constitue à nouveau à lui seul le groupe 3 (fig. 56), qui comprend le nombre de fragment le plus élevé (fig. 57). Le groupe 1 est composé de *Quercus pedunculata* et *Corylus*, *Acer*, *Carpinus* et *Pinus sylvestris*, ainsi que *Fagus*, *Fraxinus* et *Juniperus* (fig. 56). La production de gros fragments de ces taxons est plus importante que celle des espèces du groupe 2 (fig. 57) composé de *Betula*, *Pinus pinaster*, *Populus*, *Pinus sylvestris* altéré et *Betula* altéré. Ce groupe compte un très faible nombre de fragments dans les classes]2-4mm] et >4mm (fig. 57). La fragmentation des taxons à l'intérieur de ce dernier groupe présente peu de différences comme en témoigne l'inertie intra-classe très réduite visible sur le dendrogramme (fig. 55).

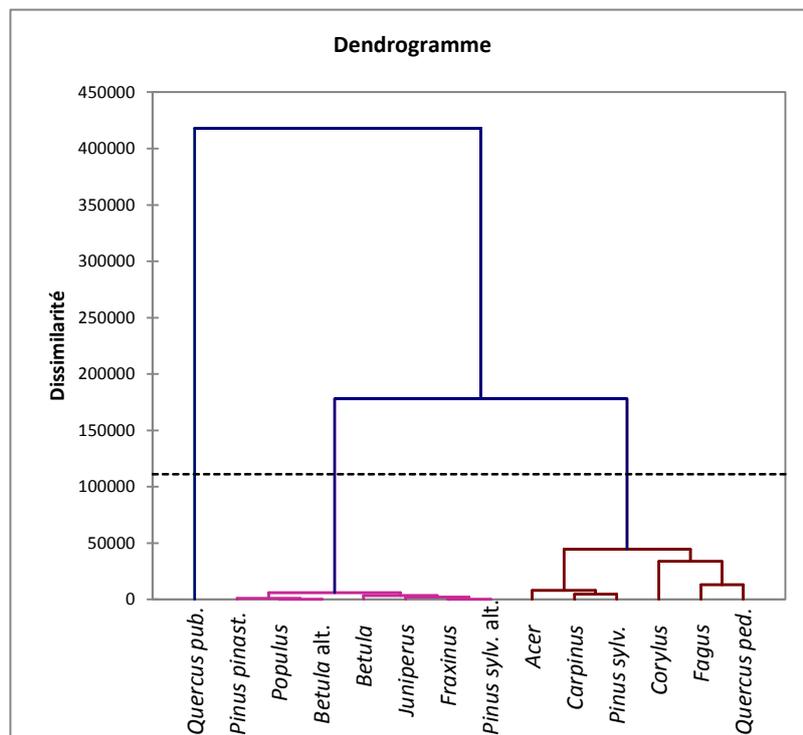


Figure 52 : Classification ascendante hiérarchique (distances euclidiennes, méthode de Ward) des taxons en fonction du nombre de fragments dans les deux classes de taille inférieures de fragments (]0.5-1mm],]1-2mm])

Groupe	1	2	3
Objets	6	7	1
Somme des poids	6	7	1
Variance intra-classe	20759.133	2114.524	0.000
Distance minimale au barycentre	81.089	27.234	0.000
Distance moyenne au barycentre	125.864	40.976	0.000
Distance maximale au barycentre	186.824	57.958	0.000
	<i>Acer</i>	<i>Betula</i>	<i>Quercus pub.</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Fraxinus</i>	
	<i>Corylus</i>	<i>Juniperus</i>	
	<i>Fagus</i>	<i>Pinus pinast.</i>	
	<i>Pinus sylv.</i>	<i>Populus</i>	
	<i>Quercus ped.</i>	<i>Betula alt.</i>	
		<i>Pinus sylv. alt.</i>	

Figure 53 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (petits fragments)

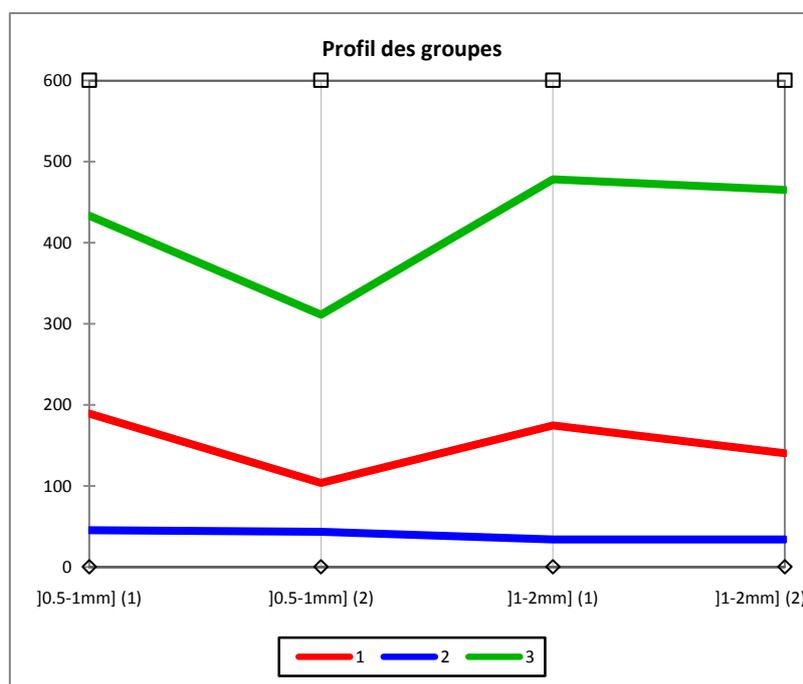


Figure 54 : Profil des groupes (petits fragments)

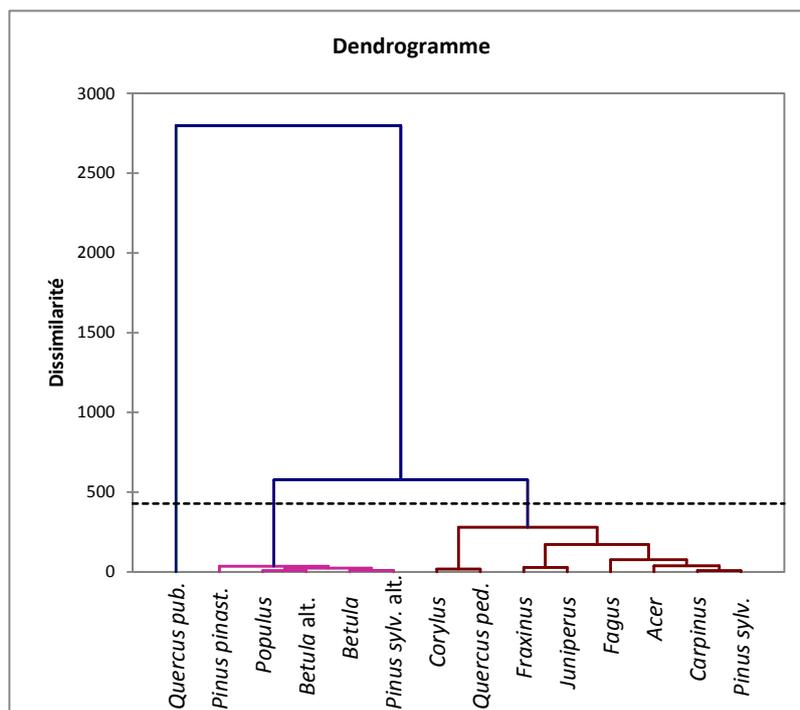


Figure 55 : Classification ascendante hiérarchique (distances euclidiennes, méthode de Ward) des taxons en fonction du nombre de fragments dans les deux classes de taille supérieures de fragments ([2-4mm], >4mm)

Groupe	1	2	3
Objets	8	5	1
Somme des poids	8	5	1
Variance intra-classe	87.982	18.600	0.000
Distance minimale au barycentre	4.200	2.307	0.000
Distance moyenne au barycentre	8.239	3.703	0.000
Distance maximale au barycentre	13.588	5.322	0.000
	<i>Acer</i>	<i>Betula</i>	<i>Quercus pub.</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Pinus pinast.</i>	
	<i>Corylus</i>	<i>Populus</i>	
	<i>Fagus</i>	<i>Betula alt.</i>	
	<i>Fraxinus</i>	<i>Pinus sylv. alt.</i>	
	<i>Juniperus</i>		
	<i>Pinus sylv.</i>		
	<i>Quercus ped.</i>		

Figure 56 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (gros fragments)

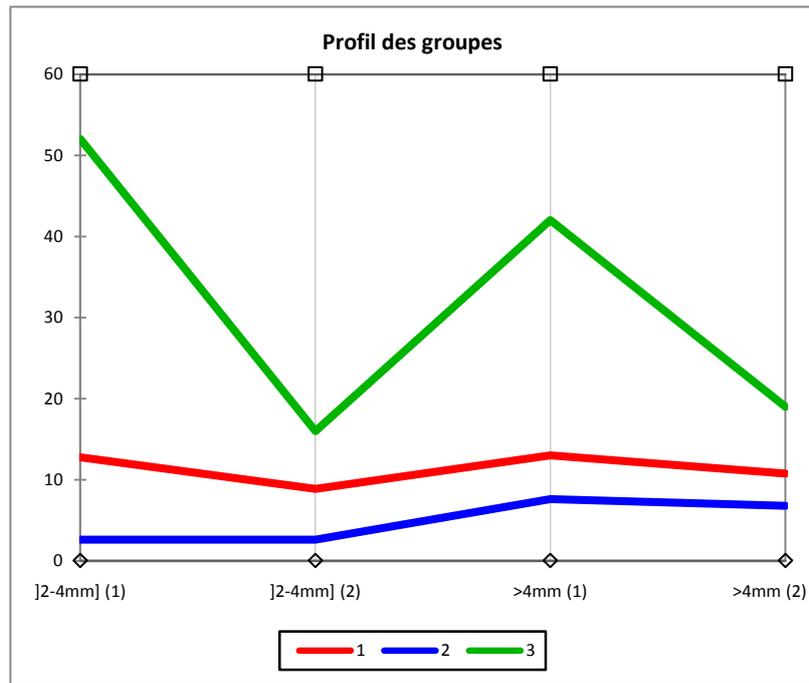


Figure 57 : profil des groupes (gros fragments)

Que l'on considère les petits ou les gros fragments, trois groupes de taxons globalement similaires s'individualisent. *Quercus pubescens* produit énormément de petits et de gros fragments. *Quercus pedunculata* et *Corylus*, ainsi qu'*Acer*, *Carpinus*, *Fagus* et *Pinus sylvestris* présentent une fragmentation importante bien qu'inférieure à celle de *Quercus pubescens*. Ces taxons subissent donc à la fois une fragmentation dans la masse et un effritement depuis la périphérie des fragments produits, les deux processus étant visiblement liés. Inversement, *Betula*, *Pinus pinaster*, *Populus*, *Pinus sylvestris* altéré et *Betula* altéré produisent peu de fragments dans toutes les classes de taille. Ils ne subissent ni fragmentation dans la masse, ni effritement. Enfin, *Fraxinus* et *Juniperus* produisent peu de petits fragments, mais rejoignent le groupe à fragmentation relativement haute si l'on considère les classes de taille supérieures ([2-4mm], >4mm). Ils semblent donc peu sujets à l'effritement, mais subissent une fragmentation dans la masse relativement importante. Cependant, cette production élevée de gros fragments ne concerne que premier lot expérimental (cf. tableau 12 et 13) ; elle peut donc aussi être interprétée comme un aléa et non comme une propriété de ces taxons.

II.2.4. Fragmentation des charbons issus de bois altéré

Les essais en compression axiale menés par Théry-Parisot ont montré que les propriétés mécaniques des charbons issus de bois altérés sont diminuées et que leur résistance à l'écrasement est bien inférieure à celle des charbons issus de bois sains. De même, lors des tests de gel-dégel réalisés par cet auteur, l'état initial du bois apparaissait comme un des critères majeurs de variation de l'intensité de la fragmentation (Théry-Parisot, 1998, 2001).

Dans notre expérience, les charbons issus de bois altérés sont très peu fragmentés. *Pinus sylvestris* altéré et *Betula* altéré appartiennent tous deux à la classe la moins fragmentée, quelle que soit la taille des fragments considérée. La forme altérée de *Pinus sylvestris* et de *Betula* est même moins fragmentée que leurs homologues saines.

Le niveau d'altération initial de *Pinus sylvestris* et *Betula* était très élevé. Le pin sylvestre a été ramassé, pourri au sol, sur le plateau de Caussols (arrière-pays Grassois). Le bois avait un aspect macroscopique extrêmement dégradé, largement attaqué par les xylophages et les agents bactériologiques, il ne possédait plus d'écorce, était creusé de nombreuses galeries et « partait » très facilement en poussière (annexe III.3.). Il est clair que la résistance mécanique du bois était déjà largement amoindrie. Le bouleau était issu d'un bois coupé sur pied (Bourgogne) ayant été entreposé très longuement en extérieur. L'écorce était encore présente, les attaques de xylophages et d'agents bactériologiques étaient sans doute moins importantes que dans le cas de *Pinus*, mais le bois était d'une légèreté extrême et la structure ligneuse avait clairement été atteinte.

Au vu de l'aspect macroscopique du bois utilisé et de sa très grande altération, la très faible fragmentation de ces échantillons est surprenante.

Dans les expérimentations d'I. Théry-Parisot, les lots expérimentaux destinés à étudier l'incidence de l'état initial du bois étaient constitués de taxons différents. *Pinus sylvestris* et *Alnus* étaient testés à l'état sain, tandis que *Salix* documentait l'état altéré. Il est donc difficile dans cette expérience de faire la part entre l'incidence de la variable « taxon » et celle de la variable « état du bois ». Dans nos essais, il semble que la variable « taxon » ait un effet plus important sur la fragmentation que l'état initial du bois. Toutefois, nos lots sains et altérés provenant d'individus différents, on ne peut exclure que la variabilité intra-spécifique

joue ici de manière complexe, masquant les effets de l'altération du bois sur la fragmentation.

II.2.5. Influence des caractéristiques physiques des fragments initiaux et des taxons sur la fragmentation

Les différences observées entre taxon nous amènent logiquement à étudier la relation entre les caractéristiques physiques des essences, la morphologie des fragments initialement utilisés et l'intensité de la fragmentation. Nous avons donc réalisé une série de tests de corrélation sur les données en notre possession.

Les fragments ayant été pesés et mesurés individuellement avant l'expérimentation, nous disposons de plusieurs séries de valeur : volume des fragments (V), masse volumique des fragments (MV), mesures de porosité (« P indice » = différence bois initial/bois final ; « P globale » = porosité globale de l'échantillon) réalisées par analyse d'image sur photos MEB (cf. chapitre II, § II.2.), ainsi que le nombre total de fragments >1mm (Nb. Fragts.) produits à l'issue de l'expérimentation¹⁰.

Variables	V	MV	P indice	P globale	Nb. Fragts
V	1	0.315	0.161	-0.182	0.206
MV	0.315	1	0.410	-0.201	0.538
P indice	0.161	0.410	1	0.042	0.590
P globale	-0.182	-0.201	0.042	1	0.065
Nb. Fragts	0.206	0.538	0.590	0.065	1

Figure 58 : Matrice des corrélations de Spearman. Liens entre les variables (les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0.05)

Variables	V	MV	P indice	P globale	Nb. Fragts
V	1	0.099	0.026	0.033	0.042
MV	0.099	1	0.168	0.040	0.290
P indice	0.026	0.168	1	0.002	0.348
P globale	0.033	0.040	0.002	1	0.004
Nb. Fragts	0.042	0.290	0.348	0.004	1

Figure 59 : Coefficients de détermination de Spearman. Liens entre les variables (en gris et gras, les coefficients présentant un intérêt pour notre analyse)

¹⁰ « Nb. Fragts » ne suit pas la loi normale et la variance des différentes séries n'est pas homogène. Nous utilisons donc un test des corrélations de Spearman.

Les corrélations positives les plus fortes apparaissent entre le **nombre de fragments produits par les cycles gel-dégel, la masse volumique (MV) et l'indice de porosité (P indice)** (fig. 58). Le nombre de fragments produits à l'issue de l'expérimentation augmente lorsque la masse volumique et la porosité augmentent (les nuages de points des valeurs sont présentées en annexe III.4.). La table des coefficients de détermination (fig. 59) indique que la masse volumique explique 29% de la variabilité de la fragmentation et l'indice de porosité 34.8%. Un test de puissance (cf. chapitre II, § III.3.) a été réalisé de manière à apprécier le degré de confiance que l'on peut accorder aux liens mis en évidence. La corrélation statistique entre la masse volumique et le nombre de fragments produits a 70% de chance d'être représentative d'une liaison réelle entre les deux variables et celle entre porosité et fragmentation atteint 77%. Les tests statistiques ne sont ici fondés que sur 28 individus (14 individus x deux lots) ; la puissance du test est donc particulièrement élevée malgré le caractère réduit de l'échantillon à partir duquel nous travaillons et elle nous semble acceptable pour conclure à la réalité des liaisons mises en évidence.

Certaines propriétés physiques (masse volumique, porosité) héritées du bois influencent donc le phénomène de fragmentation du charbon de bois ainsi que nous l'avons mis en évidence lors des tests de compression mécanique. Toutefois, les caractéristiques anatomiques jouent probablement un rôle comme cela a par ailleurs été démontré (chapitre III). De même la composition chimique, qui influence la combustion, peut aussi agir sur la fragmentation. Par ailleurs, on ne peut exclure – malgré une puissance du test acceptable – une part de réaction aléatoire et de variabilité intra-spécifique et même intra-individuelle, dont il est difficile d'évaluer l'importance sauf à multiplier de manière absolument conséquente le nombre d'expériences.

II.2.6. Influence des caractéristiques physiques sur la production des différentes tailles de fragments

Nous avons également cherché à voir si les propriétés ayant une influence sur la fragmentation (indice de porosité et masse volumique) agissent de manière différente sur la production des quatre classes de taille de fragments.

Les deux variables incidentes présentent des corrélations significatives avec toutes les classes de taille de fragments, à l'exception de la classe >4mm qui n'est pas influencée par la masse volumique (fig. 60).

Les liens positifs mis en évidence oscillent entre 18.3 et 39.2% (fig. 61). Ce test indique que **la production de gros fragments (]2-4mm], >4mm) est majoritairement influencée par la porosité du matériau, alors que la production de petits fragments dépend simultanément de la masse volumique et de la porosité.** Nous avons déjà mis en évidence le lien porosité/gros fragments et masse volumique/petit fragment dans le chapitre III sur les propriétés mécaniques des charbons de bois.

Variables	MV	P indice	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	]>4mm]
MV	1	0.368	0.535	0.551	0.427	0.378
P indice	0.368	1	0.594	0.614	0.632	0.626
]0.5-1mm]	0.535	0.594	1	0.907	0.753	0.755
]1-2mm]	0.551	0.614	0.907	1	0.736	0.654
]2-4mm]	0.427	0.632	0.753	0.736	1	0.872
]>4mm]	0.378	0.626	0.755	0.654	0.872	1

Figure 60 : Matrice des corrélations de Spearman. Lien entre les variables incidentes et le nombre de fragments par classes de taille (les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0.05)

Variables	MV	P indice	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	]>4mm]
MV	1	0.136	0.286	0.304	0.183	0.143
P indice	0.136	1	0.353	0.377	0.399	0.392
]0.5-1mm]	0.286	0.353	1	0.823	0.567	0.569
]1-2mm]	0.304	0.377	0.823	1	0.542	0.428
]2-4mm]	0.183	0.399	0.567	0.542	1	0.761
]>4mm]	0.143	0.392	0.569	0.428	0.761	1

Figure 61 : Coefficients de détermination de Spearman. Liens entre les variables incidentes et le nombre de fragments par classe de taille (en gris et gras, les coefficients présentant un intérêt pour notre analyse)

L'**incidence des propriétés physiques** sur le mécanisme de fragmentation des charbons de bois semble donc confirmée dans cette expérience, laquelle met en jeu des phénomènes de pressions extérieures proches de ceux mis en œuvre lors des tests de compression mécanique.

II.3. Synthèse des résultats et discussion

Cette expérimentation nous a donc permis de mettre en lumière un certain nombre d'informations :

- ✓ **le processus de fragmentation peut être défini de manière générale comme intense.** Tous taxons confondus, le nombre total moyen de fragments par espèce est de 251 si l'on considère les quatre classes de taille de fragments (]0.5-1mm],]1-2mm],]2-4mm], >4mm) ; le nombre de fragments est multiplié par 83.6 par rapport au début de l'expérience. Si l'on ne prend en considération que les fragments >1mm (classes]1-2mm],]2-4mm], >4mm) le nombre moyen de fragments est de 139, soit un facteur d'augmentation de 46.4.

Ce **processus de fragmentation est cependant très variable d'un taxon à l'autre.** Le nombre de fragments est multiplié par 3.3 dans le cas de *Pinus pinaster* et par 190 pour *Quercus pubescens*.

- ✓ un **mode de fragmentation différentiel des taxons** est révélé par l'analyse des données ; à des degrés divers *Quercus pubescens*, *Quercus pedunculata*, *Corylus*, *Fagus*, *Carpinus*, *Acer* et *Pinus sylvestris* allient fragmentation dans la masse et effritement du charbon depuis la périphérie. Inversement, *Pinus pinaster*, *Populus*, *Betula*, *Betula* altéré et *Pinus sylvestris* altéré sont peu fragmentés dans la masse et peu sujets à l'effritement. Enfin, *Fraxinus* et *Juniperus* sont au contraire peu effrités au regard de la fragmentation dans la masse qu'ils subissent, mais ce comportement, visible dans un lot expérimental seulement est peut-être aléatoire.
- ✓ **l'intensité de la fragmentation est en partie influencée par la masse volumique et la porosité du matériau.** La variation de ces deux propriétés peut avoir une incidence sur le mode de fragmentation différentiel des taxons. L'importance de la porosité en particulier favorise une fragmentation dans la masse (production de gros fragments), tandis que l'augmentation de la masse volumique favorise l'effritement du matériau (production de petits fragments).

- ✓ la **très faible fragmentation des taxons altérés** est inattendue et les propriétés telles que la masse volumique et la porosité ne suffisent pas à expliquer ce phénomène de manière immédiate. Bien que l'incidence du volume (V) des fragments initiaux sur leur fragmentation n'ait pas été mise en évidence par le test des corrélations de Spearman, il est possible qu'un effet d'échelle soit en partie responsable de ce phénomène.

Au vu de ces résultats, certains points méritent d'être discutés :

Dans les essais d'I. Théry, les charbons étaient congelés seuls ou dans l'eau, sans sédiment. En présence d'eau, les contenants n'étaient pas entièrement remplis et congelés ouverts. Dans ce contexte, les pressions extérieures sur le matériau liées à l'augmentation du volume de l'eau lors du gel existaient, mais elles étaient minimisées. Soumis à ce protocole, les échantillons sains ne commençaient à se fragmenter qu'à partir de 500 cycles gel-dégel et au bout de 842 cycles, le facteur d'augmentation moyen du nombre de fragment oscillait entre 6.1 et 26.3. Or, dans notre expérimentation, les 400 cycles subis induisent une fragmentation intense du matériau, bien supérieure à celle produite par le protocole précité. Il est donc clair que les **fortes pressions extérieures exercées par le gonflement du sédiment jouent ici un rôle majeur**. Lorsque le sédiment gèle, l'augmentation du volume produit un phénomène de compression important, assez proche de celui produit artificiellement sous presse dans le chapitre III. Les effets sur les taxons sont d'ailleurs relativement comparables.

Il faut toutefois noter que dans notre simulation des effets du gel-dégel, la force qui s'exerce sur les charbons de bois n'est pas nécessairement orientée dans la direction axiale, contrairement aux tests de compression du chapitre III. Le charbon étant un matériau anisotrope comme le bois (Lancelotti *et al.* 2010), l'orientation du fragment dans la matrice sédimentaire et le sens d'exercice de la contrainte sur ce fragment peuvent éventuellement avoir une incidence sur sa résistance et l'intensité de sa fragmentation. Comme c'est le cas dans la plupart des expériences mises en œuvre par la suite dans ce manuscrit, le caractère aléatoire de l'application des contraintes par rapport aux plans anatomiques du charbon explique en partie le degré de variabilité de la réponse du matériau.

Par ailleurs, il est probable que lors des cycles gel-dégel, des forces de traction s'exercent ponctuellement lesquelles induisent une contrainte supplémentaire favorisant le fort degré de fragmentation des charbons de bois. Le gel-dégel des charbons eux-mêmes doit également avoir une incidence sur le processus de fragmentation. Dans certains cas, ce que l'on pourrait appeler des « roses de charbon » (à l'instar des sols structurés type « roses de pierre ») semblent être produites par gélifraction et cryoexpulsion (planche 7, annexe III.). L'effet des pressions externes est sans doute prépondérant ; il est associé au gel-dégel des fragments eux-mêmes et à l'effet d'usure produit par la répétition des cycles, phénomène qui n'était pas opérant au cours des essais du chapitre III.

Lors des essais de compression axiales (chapitre III), *Quercus* et *Populus* constituaient les deux extrêmes haut et bas (en termes de nombre de fragments), ce qui est à peu de chose près notre cas ici (*Populus* étant extrêmement peu fragmenté). *Pinus pinaster*, qui est l'espèce la moins fragmentée dans la présente expérience, l'était un peu plus lors des tests de compression, mais ce taxon faisait déjà partie du groupe à tendance basse. Celui-ci était composé de *Fagus*, *Acer*, *Betula*, *Pinus pinaster*, l'extrême bas correspondant à *Populus*. Le groupe à tendance haute comprenait quant à lui *Corylus*, *Carpinus* et *Fraxinus*. *Pinus sylvestris* présentait un comportement médian, qu'il conserve globalement ici. Ainsi, si les résultats des essais de compressions mécaniques sont assez proches de ceux que nous venons de présenter, on notera toutefois quelques divergences. *Acer* et *Fagus* sont plus fragmentés dans les essais de gel-dégel et *Fraxinus* présente une fragmentation dans la masse plus importante dans cette nouvelle expérience alors qu'il produisait surtout des petits fragments lors des tests de compression.

Une accentuation de la fragmentation peut être interprétée comme une **plus grande gélivité** des essences concernées, mais aussi comme leur **sensibilité à l'usure** du matériau générée par la **répétition** des cycles de pression.

Concernant la fragmentation des taxons altérés, il est très clair que si nous réalisons des tests de compression mécanique tels que ceux présentés au chapitre III sur ces échantillons, nous observerions, ainsi que cela a été montré par I. Théry (1998, 2001), que leur seuil de rupture est beaucoup plus faible que celui des taxons sains. Nous aurions d'ailleurs probablement de grandes difficultés à obtenir des échantillons carbonisés à haute

température. Nous avons en effet observé que les combustions en foyer ouvert menées à partir de ces bois conduisent très rapidement à la quasi disparition de la matière initiale. Leur structure ligneuse étant très largement altérée, leur combustion produit très peu de restes et que ceux-ci se présentent quasiment exclusivement sous forme de cendres et de poussière de charbon. Les quelques résidus solides sont de petite taille, le plus souvent extrêmement friables, leur surface externe se délitant facilement en poussière fibreuse. Leur masse volumique est très faible. Par rapport aux mêmes taxons dans leurs formes saines, on passe de 0.20 à 0.14 dans le cas de *Betula* et de 0.16 à 0.12 dans le cas de *Pinus sylvestris*.

Les fragments sélectionnés pour constituer les échantillons utilisés dans cette expérience et celles qui suivent, sont ceux qui étaient les plus gros et surtout les moins friables. Ils correspondent sans doute aux parties les moins altérées des bois initiaux. Ils restent toutefois plus petits et de densité bien inférieure aux charbons issus des taxons sains.

Ces deux caractéristiques peuvent avoir une incidence sur la fragmentation des échantillons testés. En particulier, les différences de volumes peuvent induire un « effet d'échelle ». Plus un fragment est gros, plus il présente de zones de fragilité et donc plus il sera susceptible de se rompre et inversement. D'après les tests de corrélation (§ II.2.5.), le volume initial des fragments n'a pas d'incidence sur l'intensité de leur fragmentation. Mais il faut toutefois préciser que la mesure des dimensions des fragments, dont la forme est irrégulière, reste approximative, et cela doit contribuer à niveler les différences de volume et donc à réduire l'incidence de cette variable. Nous n'excluons donc pas, malgré les résultats du test, que le volume initial des fragments puisse avoir une incidence sur l'intensité de la fragmentation. De plus, l'effet des autres facteurs (caractéristiques anatomiques et physiques des taxons) masque peut-être en partie l'influence du volume n'agissant que de manière secondaire ou en interaction avec les facteurs prépondérants.

Par ailleurs, nous avons observé dans le chapitre III que la résistance mécanique des charbons n'est pas reliée de manière linéaire à l'intensité de la fragmentation ; les taxons dont le seuil de rupture est le plus faible ne sont pas toujours ceux qui produisent le plus de fragments. La masse volumique est plus incidente sur la fragmentation que la résistance mécanique. Plus elle est élevée, plus le nombre de fragments augmente. Or, les fragments de charbon issus des bois altérés sont plus fragiles que les autres ; la seule observation à l'œil et au toucher suffit à le constater. Mais leur densité apparente étant extrêmement

diminuée, peu de résistance s'exerce à l'intérieur du matériau. Soumis à une pression extérieure, celui-ci aura tendance à s'écraser plutôt qu'à se rompre en une multitude de petits fragments comme c'est le cas pour les matériaux plus denses.

Le passage d'un matériau encore doué de quelque résistance et qui pourra être fragmenté, à un matériau dont la fragilité conduit à terme à son écrasement, dépend probablement du niveau d'altération du bois. Dans notre cas, les fragments étaient sans doute suffisamment « mous » pour que leur volume fluctue avec le gonflement du sédiment. Encore une fois ici, il ne s'agit pas d'un processus « élastique » au sens mécanique du terme, car le processus n'est pas réversible ; soumis à un processus d'usure et de pression répété, les charbons issus de bois altérés auront *a priori* tendance à se déliter en fine poussière impossible à collecter et étudier (et donc à disparaître) plutôt qu'à produire de nombreux fragments. En ce sens, nos résultats, en apparence divergent par rapport à ceux de Théry-Parisot, ne modifient pas selon nous la conclusion majeure de son analyse, à savoir la moins bonne préservation des charbons issus de bois altéré. Une gradation doit cependant exister, dépendante du niveau d'altération de la structure ligneuse et donc de la perte de densité du bois conduisant à la modification de ses propriétés mécaniques. Plus la perte de densité est importante, plus le matériau aura tendance à terme à s'écraser et donc à disparaître, plutôt qu'à se fragmenter.

Conclusion du chapitre IV

Par rapport aux données précédemment acquises (Théry-Parisot, 2008, 2001), l'expérience en conditions contrôlées met clairement en évidence le **rôle majeur des fortes pressions externes générées par le gonflement du sédiment** sur la fragmentation des charbons de bois. Lorsque le gel des charbons eux-mêmes est le processus majeur mis en œuvre, la fragmentation est très réduite, même à long terme ; inversement, en présence de sédiment, la fragmentation est intense. Cependant tous les taxons ne semblent pas égaux face au phénomène et certains sont très peu affectés quand d'autres le sont énormément.

Il faut également noter que la matrice sédimentaire utilisée – très plastique et gélive – la saturation en eau au moment du dépôt, l'intensité du gel, la répétition accrue du nombre de cycles et l'amplitude thermique importante (température ambiante $\approx +20^{\circ}\text{C}$ /

congélation -15°C) et relativement rapide qui les caractérisent constituent un ensemble de paramètres créant des conditions optimales d'expression des effets de l'alternance gel-dégel. Ceux-ci sont sans doute accentués par rapport à la réalité dans nombre de situation et en particulier en contexte de cavité. Le « climat » des grottes est généralement beaucoup moins variable que celui qui préside à l'extérieur. À Gavarnie, dans la grotte du névé, la température est plus stable, mais on compte tout de même 26 cycles gel-dégel annuels à la surface du sol, soit à peine moins que sur le versant sud. La différence de préservation des charbons entre intérieur et extérieur alors que le nombre de cycles est quasiment équivalent montre bien que, dans notre première expérimentation, les alternances gel-dégel ne sont pas le facteur déterminant de l'altération du dépôt. C'est surtout **l'atténuation des processus météoriques qui explique la meilleure préservation des charbons de bois à l'intérieur de la cavité.**

De même, si les gonflements du sédiment ont un rôle destructeur dans l'expérience de congélation, il faut noter qu'à Gavarnie, les charbons sont moins fragmentés et l'intégrité du dépôt est mieux préservée dans les cellules enfouies que dans celles laissées en surface. Ainsi, à Gavarnie, si le sédiment accentue peut-être la fragmentation (notamment par rapport aux dépôts de la grotte), il joue avant tout un rôle protecteur vis-à-vis des processus « secondaires » tels le vent, les précipitations, etc., mettant en évidence le **rôle majeur des processus liés par rapport aux seules alternances gel-dégel.**

En contexte archéologique, dans les grottes, les marques de mise en place d'un gélisol profond, voire d'un pergélisol sont parfois visibles. L'installation d'un gélisol ou d'un permafrost (qu'il soit continu ou sporadique) aura pour effet de bloquer les alternances gel-dégel, au moins en profondeur. En surface, la couche active subit les variations thermiques (elle subit au moins un cycle gel-dégel par an) et c'est donc dans cette couche que sera accentuée l'altération du matériel. L'amplitude de la couche active sera alors déterminante, mais celle-ci est rarement identifiée dans les dépôts. La cryoturbation résulte du gonflement différentiel au gel des sédiments adjacents ou superposés, en relation avec l'état hydrique lors de l'engel. Les involutions spectaculaires visibles dans certains sites ne sont pas nécessairement les plus dommageables en termes d'intégrité des dépôts archéologiques (elles n'induisent pas le tri du matériel, sa circulation verticale, etc.), elles doivent néanmoins être le fruit de fortes pressions, potentiellement destructrices pour un

matériau peu résistant comme le charbon de bois. L'altération des charbons de bois par ce type de processus n'a pas été testée dans nos expériences. De même, l'altération propre aux coulées de solifluxion est difficile à mesurer à Gavarnie puisque les autres agents météoriques agissent simultanément sur le matériel. Il serait nécessaire de continuer à étudier l'impact des processus cryogéniques sur les charbons de bois, notamment par des simulations en conditions contrôlées.

S'agissant de la réaction différentielle des taxons, dans les deux expérimentations, la **fragmentation est significativement différente entre les espèces testées**. Ceci indique que les **phénomènes périglaciaires** sont susceptibles d'induire la **surreprésentation** de certains taxons et peuvent constituer un facteur de biais à l'heure de l'interprétation paléoenvironnementale. Il est toutefois étonnant que les taxons se fragmentant le plus dans l'un des essais n'aient pas nécessairement le même comportement dans l'autre. Or, le matériel expérimental est issu de deux lots de bois différents. Aussi, soit les seuils de pression et mécanismes d'altération et de fragmentation du matériel sont différents entre les deux expériences, générant des réactions des taxons divergentes ; soit le lot de bois d'origine fait, autant que l'espèce elle-même, varier le comportement à la fragmentation. La **variabilité inter-individuelle** pourrait alors être aussi importante que la variabilité interspécifique.

La principale divergence taxonomique concerne le comportement de *Quercus* qui est le taxon le moins fragmenté à Gavarnie alors que les deux espèces du genre le sont fortement dans les tests de gel-dégel. Il faut également noter que le volume (et donc la masse) des fragments de ce taxon à Gavarnie était nettement réduit par rapport à ceux des autres essences (cf. ce chapitre § 1.5.3.4. ; tableau 8). Il est donc possible qu'un **effet d'échelle** participe de cette divergence de résultat.

L'incidence de la variabilité intra-spécifique comme celle résultant de la taille initiale des fragments sont des points, qui, parce qu'ils peuvent minimiser ou au contraire se surajouter à la variabilité taxonomique, devront être testés lors de travaux ultérieurs.

CHAPITRE V

MÉTÉORISATION, PROCESSUS SÉDIMENTAIRES, ACTION DE L'EAU, VARIATIONS DU PH DU MILIEU ET PIÉTINEMENT : LES EFFETS INDUITS SUR LES CHARBONS DE BOIS

Introduction

Dans ce chapitre sont présentées successivement plusieurs expérimentations ayant pour but d'évaluer l'incidence de processus tels que la météorisation, l'alternance de cycles de retrait-gonflement du sédiment, l'imbibition et la dessiccation des fragments de charbon bois eux-mêmes, la variation du pH du milieu et le piétinement sur le matériel anthracologique.

Les processus et les mécanismes d'altération potentielle qui les sous-tendent sont décrits en amont de chaque partie, de même que le détail de chaque protocole expérimental. Sont étudiés précisément les effets induits et, en particulier, la fragmentation, plus ou moins importante, que génère l'exposition du matériel à chacun des processus mis en œuvre.

Une attention particulière est portée aux différences taxonomiques de comportement ainsi qu'aux facteurs qui peuvent, au moins partiellement, expliquer la variabilité des réponses observées.

Une « gradation » de l'incidence des processus testés, tant du point de vue de la rapidité de leur action que de leur « pouvoir destructeur », peut ainsi être envisagée.

I. LA FRAGMENTATION DES CHARBONS DE BOIS PAR MÉTÉORISATION

I.1. Introduction

La « météorisation » désigne en géologie l'ensemble des processus de dégradation subis par les roches au contact des agents atmosphériques. Ils comprennent des processus physiques (fragmentation d'origine thermique, hydrique, etc.), chimiques (dissolution, oxydation, carbonatation, etc.) et biologiques (activité racinaire, fongique, sécrétion enzymatique des micro-organismes, etc.) souvent interagissant. Ils induisent la fragmentation et/ou la décomposition des roches et, de la même manière, peuvent générer une altération des vestiges archéologiques. S'ils sont parfois envisagés comme cause de dégradation au moins partielle des structures de combustion, on ne connaît pas leurs effets

sur le « matériau charbon » lui-même. À Gavarnie, nous avons constaté que les charbons de bois sont mieux conservés dans la cavité par rapport aux dépôts extérieurs. Sur le versant, les dépôts enfouis sont mieux préservés que les dépôts de surface. Il semble donc que l'atténuation des effets des processus météoriques par le « climat » de la grotte et, dans une moindre mesure, par l'enfouissement du matériel anthracologique, contribue à sa meilleure conservation. Les résultats précédemment présentés suggèrent donc que les processus météoriques jouent un rôle prépondérant dans la disparition par dispersion et par fragmentation des charbons de bois.

Afin de tester les effets spécifiques des processus météoriques, deux lots de charbons de bois ont été déposés dans deux stations météorologiques des Alpes-Maritimes. Loin des conditions particulièrement rudes des contextes périglaciaires, la variabilité des conditions topographiques et météorologiques des deux stations permet toutefois d'envisager le comportement des charbons de bois en fonction des conditions de dépôt. De même, la prise en compte des réponses d'une série de taxons aux sollicitations induites par les agents atmosphériques permet d'aborder la question de la variabilité inter-spécifique.

I.2. Protocole expérimental

I.2.1. Stations de dépôt

Les deux stations météorologiques sont situées dans le département des Alpes-Maritimes. La première est implantée au Mont Arpasse sur la commune de Levens à 692m d'altitude. La végétation y est peu développée ; en position dominante, le plateau calcaire qui surplombe la vallée du Var est relativement froid, sec et exposé aux vents. La seconde station, à Sophia-Antipolis sur la commune de Valbonne, se situe dans la pinède, à 238m d'altitude. Elle est plus abritée, chaude et humide. Dans les deux stations, nous avons eu accès aux enregistrements thermiques (températures minimale et maximale quotidiennes) et aux mesures de précipitations journalières (en mm). Le détail des enregistrements permet d'envisager plus précisément les facteurs incidents sur la réaction des charbons de bois.

I.2.2. Enregistrements météorologiques

Les tableaux 15 et 16 présentent les données moyennes mensuelles pendant la période de dépôt (de décembre 2009 à avril 2012). Les premières colonnes indiquent les températures moyennes mensuelles minimales (TMN) et maximales (TMX) et les seuils minimaux (TN) et maximaux (TX) atteints au cours du mois. Le nombre de jours où la température passe en dessous de 0°C est décompté, induisant un nombre maximal de cycles gel-dégel des fragments de charbon. L'amplitude thermique quotidienne moyenne et maximale du mois est calculée. Le total mensuel de précipitations est calculé et le nombre de jours avec pluie est décompté. Dans le tableau 17, les données moyennes pour toute la durée de dépôt dans les deux stations sont présentées. Nous avons ajouté le nombre total de jour de pluie suivi d'un lendemain sans précipitations. Un nombre maximal de cycles d'humidification (ou d'imbibition selon l'ampleur et la durée des précipitations) et de séchage du matériel peut être envisagé à partir de cette donnée.

Les températures moyennes minimales et maximales sont plus basses à Levens (de 7.3 à 15.8°C contre 11.1 à 18.4°C à Valbonne). Le nombre de jours où la température est inférieure à 0°C y est bien plus élevé ; 89 contre seulement 20 à Valbonne. Cette différence est notable entre les deux stations, d'autant plus que lorsque la température est négative à Valbonne, elle ne l'est souvent que de quelques dixièmes de degrés, alors qu'elle atteint -7.8°C à Levens. À cela s'ajoute une amplitude thermique quotidienne moyenne légèrement plus importante à Levens (tableaux 15, 16 et 17). En deux ans et demi, les précipitations présentent une différence de 500mm entre les deux stations ; le régime est donc non seulement plus froid, mais aussi plus sec à Levens. Le nombre de jour avec pluie dont le lendemain est sec est en revanche à peu près équivalent (tableau 17).

Période	TMN	TMX	TN	TX	Jours avec T°<0°C	Amplitude thermique moyenne	Amplitude thermique maximale	Précipitations (mm)	jours avec pluie
déc-09	0.5	7.1	-6.9	11.9	7	6.6	18.8	158.3	10
janv-10	-0.2	6.1	-3.2	9.9	17	6.3	13.1	67.8	12
févr-10	0.2	8.0	-7.3	13.2	9	7.9	20.5	142.1	14
mars-10	3.2	11.0	-2.2	15.9	6	7.8	18.1	45.5	10
avr-10	6.1	15.4	1.2	22.0	0	9.3	20.8	28.8	10
mai-10	8.9	17.6	4.1	22.7	0	8.6	18.6	123.8	16
juin-10	13.8	22.1	10.0	26.5	0	8.4	16.5	60.6	9
juil-10	18	27.4	12.8	29.7	0	9.4	16.9	0.6	1
août-10	15.3	25.0	10.1	29.9	0	9.7	19.8	27.6	9
sept-10	12.0	21.5	6.3	24.8	0	9.5	18.5	48.5	8
oct-10	8.6	16.2	4.1	20.8	0	7.6	16.7	179.2	11
nov-10	4.3	10.7	-3.7	17.8	4	6.4	21.5	133.1	14
déc-10	0.4	6.9	-6.5	17.1	13	6.5	23.6	161.5	11
janv-11	1.6	8.3	-2.4	14.8	7	6.7	17.2	69.3	8
févr-11	2.3	9.7	0.0	14.2	0	7.4	14.2	52.6	8
mars-11	4.2	11.6	-0.6	17.1	3	7.4	17.7	175.7	10
avr-11	8.9	17.2	4.6	22.9	0	8.4	18.3	30.4	8
mai-11	11.3	20.7	7.1	26.5	0	9.5	19.4	14.3	6
juin-11	13.7	22.2	9.5	27.9	0	8.5	18.4	72.8	12
juil-11	14.7	23.8	10.1	29.4	0	9.1	19.3	40.8	7
août-11	17.0	26.7	13.3	32.9	0	9.8	19.6	2.4	4
sept-11	14.5	24.0	8.6	28.0	0	9.5	19.4	61.4	9
oct-11	10.0	18.4	5.7	25.5	0	8.4	19.8	84.1	4
nov-11	6.6	14.1	2.7	16.6	0	7.4	13.9	204.6	11
déc-11	3.2	11.1	-3.6	15.2	3	7.9	18.8	22.4	4
janv-12	2.0	9.3	-3.5	15.7	5	7.3	19.2	52.8	7
févr-12	-0.9	7.9	-7.8	16.2	15	8.9	24.0	0.6	3
mars-12	6.2	15.2	0.8	20.2	0	9.0	19.4	11.8	5
avr-12	6.1	14.5	2.9	25.2	0	8.4	22.3	225.1	16

Tableau 15 : Données thermiques et pluviométriques. Station de Levens (TMN : Température moyenne minimale ; TMX : température moyenne maximale ; TN : température minimale ; TX : température maximale)

Période	TMN	TMX	TN	TX	Nb. jours T°<0°C	Amplitude thermique moyenne	Amplitude thermique maximale	Précipitations (mm)	Nb. jours avec pluie
déc-09	4.2	12.1	-2.2	18.5	3	7.9	20.7	139.9	7
janv-10	3.7	10.6	-0.7	13.1	1	6.9	13.8	99.7	13
févr-10	4.3	11.2	-2.2	16.6	2	6.8	18.8	137	13
mars-10	7.0	13.8	2.1	15.6	0	6.8	13.5	53	10
avr-10	10.2	18.1	6.5	24.6	0	7.9	18.1	14.2	8
mai-10	12.1	20.3	5.6	27.7	0	8.2	22.1	97.3	10
juin-10	16.6	24.3	11.7	28.2	0	7.7	16.5	53.8	6
juil-10	21.6	29.8	18.8	33.4	0	8.3	14.6	0	0
août-10	18.7	27.3	14.7	32.2	0	8.7	17.5	59.2	5
sept-10	16.0	24.3	9.9	27.1	0	8.3	17.2	29.9	8
oct-10	12.0	18.8	7	23.6	0	6.8	16.6	281.3	10
nov-10	7.7	14.4	-0.3	20.9	1	6.7	21.2	157.2	17
déc-10	4.3	10.1	-0.7	19	5	5.8	19.7	164.9	14
janv-11	5.7	11.1	2.5	16.1	0	5.4	13.6	59.2	8
févr-11	6.0	12.4	1.2	17.1	0	6.4	15.9	97.7	10
mars-11	7.7	14.2	3	20.4	0	6.4	17.4	219.1	11
avr-11	11.6	19.1	8.2	24.3	0	7.5	16.1	31.4	13
mai-11	15.4	23.3	11.9	29.1	0	7.9	17.2	3.4	4
juin-11	16.6	24.9	12	29.1	0	8.4	17.1	126.5	9
juil-11	18.0	25.9	14.4	30.6	0	7.9	16.2	57.2	6
août-11	19.7	28.3	16.5	34.6	0	8.6	18.1	15.3	8
sept-11	18.4	26.5	13.7	30.2	0	8.1	16.5	12.2	10
oct-11	13.8	21.2	8.7	29.2	0	7.4	20.5	149.8	5
nov-11	11.0	16.8	8.9	19.3	0	5.8	10.4	289	10
déc-11	7.4	14.3	1.6	18.3	0	6.9	16.7	26.1	6
janv-12	6.2	12.7	0.1	20.5	0	6.5	20.4	65.4	7
févr-12	3.0	11.2	-3.3	18.2	8	8.2	21.5	2.2	4
mars-12	9.3	17.1	3.4	22.4	0	7.8	19	27.6	9
avr-12	9.5	17.3	6.9	23.1	0	7.7	16.2	206.3	14

Tableau 16 : Données thermiques et pluviométriques. Station de Sophia-Antipolis (TMN : température moyenne minimale ; TMX : température moyenne maximale ; TN : température minimale ; TX : température maximale)

Station	TMN	TMX	TN	TX	Nb. jours T°<0°C	Amplitude thermique moyenne	Amplitude thermique maximale	Précipitations (mm)	Nb. jours avec pluie	Nb. jours pluie suivi par jour sans pluie
Levens	7.3	15.5	-7.8	32.9	89	8	24.0	2298.5	257	128
Valbonne	11.1	18.4	-3.3	34.6	20	7.3	22.1	2797.7	276	134

Tableau 17 : Synthèse des données thermiques et pluviométriques sur le total de la période décembre 2009 - avril 2012 pour les deux stations

I.2.3. Échantillons expérimentaux

Onze espèces de feuillus et de conifères fréquemment retrouvées en contexte archéologique sont testées dans le cadre de cette expérience : *Acer pseudoplatanus*, *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Juniperus oxycedrus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Populus alba* et *Quercus pedunculata*.

Le bouleau (*Betula pubescens*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) sont également intégrés dans un état de dégradation avancé.

Le lot de bois utilisé est le même que celui de l'expérience de gel-dégel en laboratoire. Les combustions sont menées en foyer ouvert conformément à la description du chapitre II (§ I.3.). Le matériel expérimental est constitué de gros fragments de charbon de chaque essence prélevés dans les résidus de combustion supérieurs à 4mm, pesés et mesurés avant la mise en place de l'expérimentation.

Deux lots de deux charbons sont déposés par espèce dans chaque station ($n = (2 \text{ fragments} \times 2 \text{ lots} \times 2 \text{ stations}) \times (11 \text{ taxons sains} + 2 \text{ taxons altérés}) = 104 \text{ fragments}$). Des contenants en grillage fin (maille <1mm) sont fabriqués afin de recevoir les charbons de bois. L'ensemble des contenants est fixé à l'intérieur d'une solide cagette de bois de manière à être légèrement surélevé par rapport à la surface du sol (cf. planche 8, annexe IV.1.).

I.2.4. Temps de dépôt et traitement du matériel à l'issue de l'expérimentation

Le dispositif expérimental a été déposé dans les deux stations le 16 décembre 2009. Le 14 septembre 2010 une visite de contrôle a été effectuée. Le matériel avait alors très peu évolué. Après un peu moins d'un an de dépôt, une amorce de fragmentation était visible pour une partie des taxons à Levens, mais encore extrêmement réduite. À Valbonne aucune trace de fragmentation n'était perceptible, en revanche les charbons étaient humides. Les prélèvements ont eu lieu le 24 avril 2012, soit après un peu moins de deux ans et demi de dépôt. Les contenants sont rouverts à l'issue de l'expérimentation, les particules végétales qui se s'étaient glissées à l'intérieur ont été triées manuellement et éliminées et les fragments de charbons ont été tamisés sur une colonne [1-2mm], [2-4mm], >4mm, puis pesés par fraction. Le décompte des fragments par classe de taille est réalisé manuellement

ou par analyse d'image (cf. chapitre II, § II.1.). Contrairement à l'expérience précédente, la poussière de charbon <1mm n'est pas préservée dans les contenants grillagés, elle n'est donc pas comptabilisée. La perte de matériel, très réduite, peut difficilement être évaluée car des mousses se sont implantées sur les charbons et l'on retrouve souvent à la pesée plus de matériel à l'issue de l'expérimentation qu'au départ. Le phénomène est systématique à Valbonne et occasionnel à Levens.

I.3. Présentation des résultats

I.3.1. Fragmentation des charbons de bois dans les deux stations expérimentales : observations générales

Taxons	]1-2mm] (1)	]2-4mm] (1)	>4mm (1)	total >1mm (1)	Nb. de charbons déposés	facteur d'augment° (1)
<i>Acer</i>	34	15	7	56	2	28
<i>Betula</i>	9	0	3	12	2	6
<i>Carpinus</i>	29	13	13	55	2	27.5
<i>Corylus</i>	140	49	21	210	2	105
<i>Fagus</i>	252	83	33	368	2	184
<i>Fraxinus</i>	5	2	2	9	2	4.5
<i>Juniperus</i>	35	19	9	63	2	31.5
<i>Pinus pinast.</i>	15	1	5	21	2	10.5
<i>Pinus sylv.</i>	17	2	2	21	2	10.5
<i>Populus</i>	2	2	3	7	2	3.5
<i>Quercus ped.</i>	142	8	8	158	2	79
<i>Betula alt.</i>	3	2	2	7	2	3.5
<i>Pinus sylv. alt.</i>	0	16	2	18	2	9

Tableau 18 : Nombre de fragments par classe de taille dans le premier lot de charbons déposé à Levens

Taxons	]1-2mm] (2)	]2-4mm] (2)	>4mm (2)	total >1mm (2)	Nb. de charbons déposés	Facteur d'augment° (2)
<i>Acer</i>	12	1	8	21	2	10.5
<i>Betula</i>	12	12	5	29	2	14.5
<i>Carpinus</i>	59	39	15	113	2	56.5
<i>Corylus</i>	34	29	21	84	2	42
<i>Fagus</i>	223	104	34	361	2	180.5
<i>Fraxinus</i>	3	1	6	10	2	5
<i>Juniperus</i>	24	0	2	26	2	13
<i>Pinus pinast.</i>	6	0	2	8	2	4
<i>Pinus sylv.</i>	32	6	3	41	2	20.5
<i>Populus</i>	9	1	2	12	2	6
<i>Quercus ped.</i>	127	9	15	151	2	75.5
<i>Betula alt.</i>	7	1	2	10	2	5
<i>Pinus sylv. alt.</i>	0	43	4	47	2	23.5

Tableau 19 : Nombre de fragments par classe de taille dans le second lot de charbons déposé à Levens

Taxon	]1-2mm] (1)	]2-4mm] (1)	>4mm (1)	total >1mm (1)	Nb. de charbons déposés	Facteur d'augment° (1)
<i>Acer</i>	1	0	2	3	2	1.5
<i>Betula</i>	1	0	2	3	2	1.5
<i>Carpinus</i>	6	0	2	8	2	4
<i>Corylus</i>	6	9	6	21	2	10.5
<i>Fagus</i>	14	7	8	29	2	14.5
<i>Fraxinus</i>	0	0	2	2	2	1
<i>Juniperus</i>	8	0	2	10	2	5
<i>Pinus pinast.</i>	1	0	2	3	2	1.5
<i>Pinus sylv.</i>	3	0	2	5	2	2.5
<i>Populus</i>	18	9	8	35	2	17.5
<i>Quercus ped.</i>	17	4	5	26	2	13
<i>Betula alt.</i>	2	2	2	6	2	3
<i>Pinus sylv. alt.</i>	24	7	3	34	2	17

Tableau 20 : Nombre de fragments par classe de taille dans le premier lot de charbons déposé à Valbonne

Taxon	]1-2mm] (2)	]2-4mm] (2)	>4mm (2)	total >1mm (2)	Nb. de charbons déposés	Facteur d'augment° (2)
<i>Acer</i>	8	0	2	10	2	5
<i>Betula</i>	3	0	2	5	2	2.5
<i>Carpinus</i>	5	1	3	9	2	4.5
<i>Corylus</i>	6	0	3	9	2	4.5
<i>Fagus</i>	8	0	3	11	2	5.5
<i>Fraxinus</i>	4	0	5	9	2	4.5
<i>Juniperus</i>	9	0	2	11	2	5.5
<i>Pinus pinast.</i>	1	1	2	4	2	2
<i>Pinus sylv.</i>	12	0	2	14	2	7
<i>Populus</i>	11	1	2	14	2	7
<i>Quercus ped.</i>	15	3	6	24	2	12
<i>Betula alt.</i>	7	3	2	12	2	6
<i>Pinus sylv. alt.</i>	7	0	2	9	2	4.5

Tableau 21 : Nombre de fragments par classe de taille dans le second lot de charbons déposé à Valbonne

La fragmentation est très inégale entre les deux stations. Elle est relativement importante à Levens alors qu'elle est fort réduite à Valbonne. Elle est également très **hétérogène entre les taxons**. À Levens (tableau 18 et 19), le nombre total de fragments le plus élevé dans les deux lots est celui de *Fagus* avec 368 fragments pour le premier et 361 pour le second, tandis que *Populus*, *Pinus pinaster* et *Betula altéré* comptent moins de 10 fragments dans l'un et l'autre des lots. Sachant que chaque lot comptait initialement 2 fragments par taxon, le facteur d'augmentation du nombre de fragments est extrêmement important pour certains taxons et très réduit pour d'autres (de 4 à 184). A Valbonne (tableau 20 et 21), le nombre total de fragments par taxon ne dépasse pas 35 et le facteur d'augmentation oscille entre 1 et 17.5.

I.3.2. Homogénéité de la fragmentation entre les lots de chaque station

Le nombre total de fragments >1mm par taxon est globalement homogène entre les deux lots de charbons à Levens (fig. 58) ; la fragmentation observée semble donc à nouveau exprimer un comportement propre aux taxons eux-mêmes. La variance (tests de Levene) des deux séries est identique dans le cas de Levens, en revanche elle est **différente à Valbonne**. Toutefois, l'effet d'hétérogénéité est surtout dû à la très faible fragmentation des

lots déposés à Valbonne (fig. 59). Les tests sur les différences de position des échantillons (Mann-Whitney) indiquent que les deux lots déposés dans chaque station présentent à l'issue de l'expérimentation une distribution identique (annexe IV.1.1.).

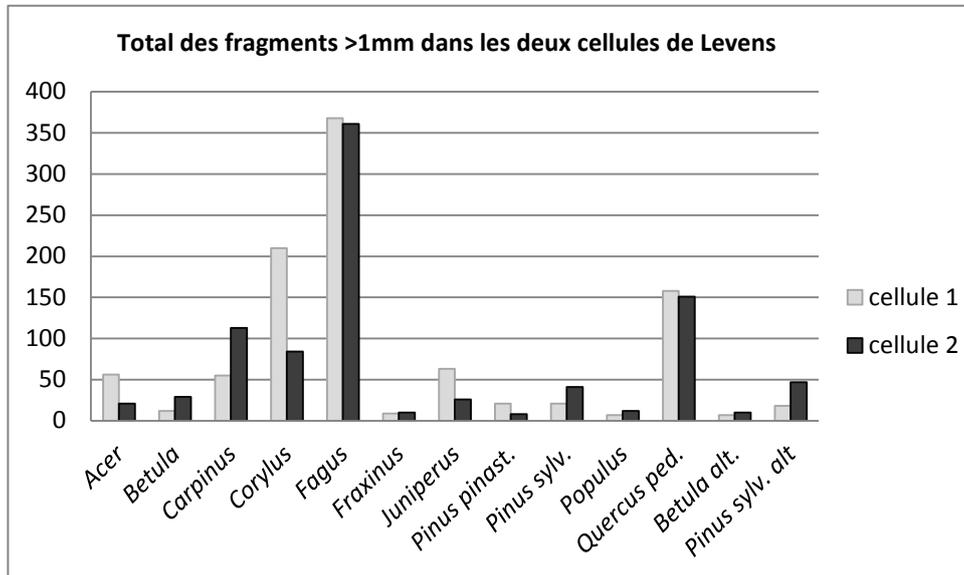


Figure 58 : Fragmentation totale (>1mm) dans les deux cellules de la station de Levens

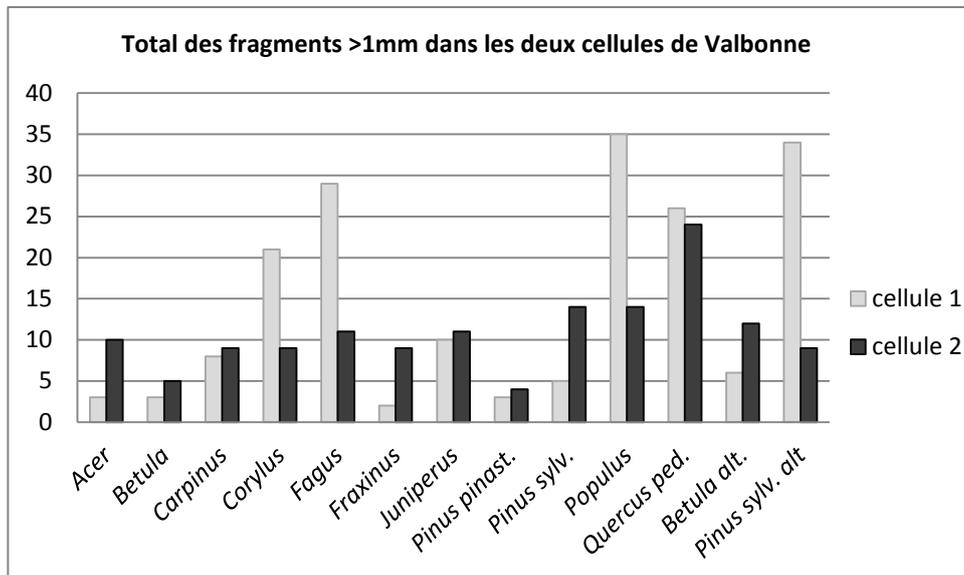


Figure 59 : Fragmentation totale dans les deux cellules de la station de Valbonne

I.3.3. Analyse statistique de la fragmentation

I.3.3.1. Station de Levens

- *Distribution des fragments par classe de taille*

Dans la station de Levens, tous taxons confondus, la classe]1-2mm] compte en moyenne 47.3 fragments, la classe]2-4mm] en compte 17.6, et 8.8 dans la classe >4mm. Le nombre de fragments est donc inversement proportionnel à la classe de taille.

La variabilité spécifique est forte au sein de chaque classe de taille. Le nombre de fragments oscille entre 0 et 252 dans la classe]1-2mm], entre 0 et 104 dans la classe]2-4mm] et entre 2 et 34 dans la classe >4mm (tableau 22 et fig. 60). Les disparités de fragmentation entre taxons sont donc très importantes.

Le plus fort coefficient de variation (dispersion d'un échantillon relativement à sa moyenne) concerne la classe]2-4mm] (tableau 22).

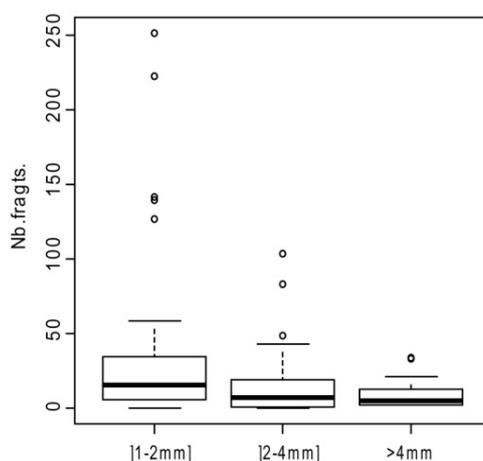


Figure 60 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille dans la station de Levens

Statistiques descriptives	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm
Minimum	0	0	2
Maximum	252	104	34
Moyenne	47.3	17.6	8.8
Médiane	16	7	5
Écart-type (n)	68.331	26.022	9.089
Coefficient de variation	1.443	1.477	1.032

Tableau 22 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille à Levens (tous taxons et lots confondus)

- *Nombre de fragments par classe de taille : différences taxonomiques*

Globalement, dans toutes les classes de taille de fragment (fig. 61, 62, 63), *Corylus*, *Carpinus* et plus encore *Fagus*, présentent une fragmentation élevée. *Quercus pedunculata* compte beaucoup de fragments dans les classes de taille inférieure et supérieure, mais assez peu dans la classe médiane]2-4mm], tandis que *Pinus sylvestris* altéré présente au contraire une fragmentation relativement importante dans la classe médiane alors qu'elle est réduite dans les autres classes de taille. Tous les autres taxons se fragmentent peu quelle que soit la taille de fragments considérée.

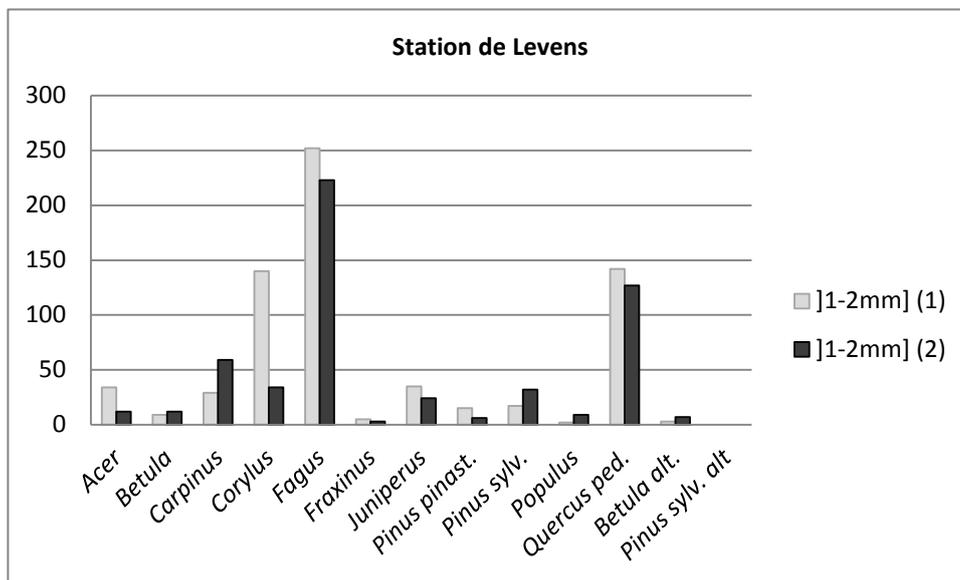


Figure 61 : Nombre de fragments]1-2mm] dans les deux cellules de la station de Levens

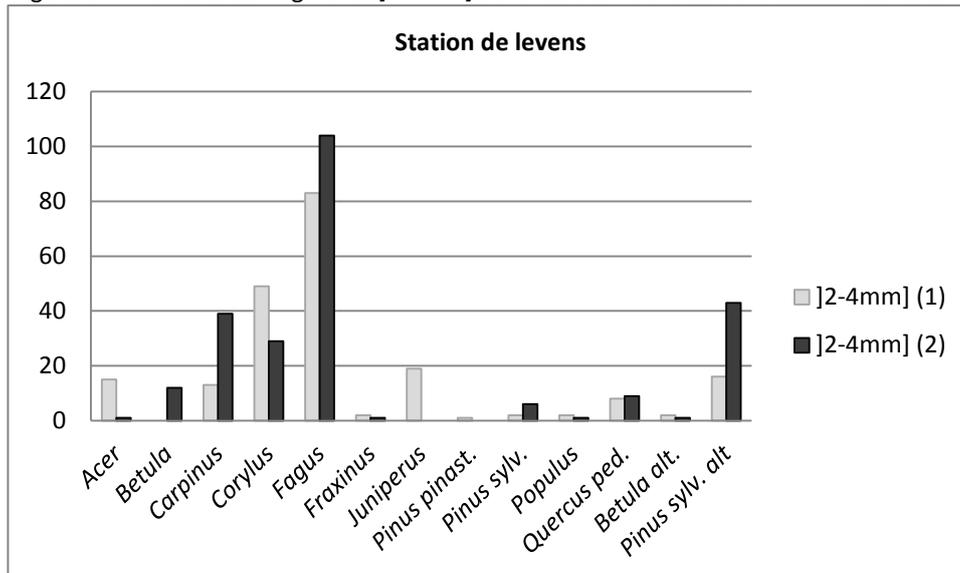


Figure 62 : Nombre de Fragments]2-4mm] dans les deux cellules de la station de Levens

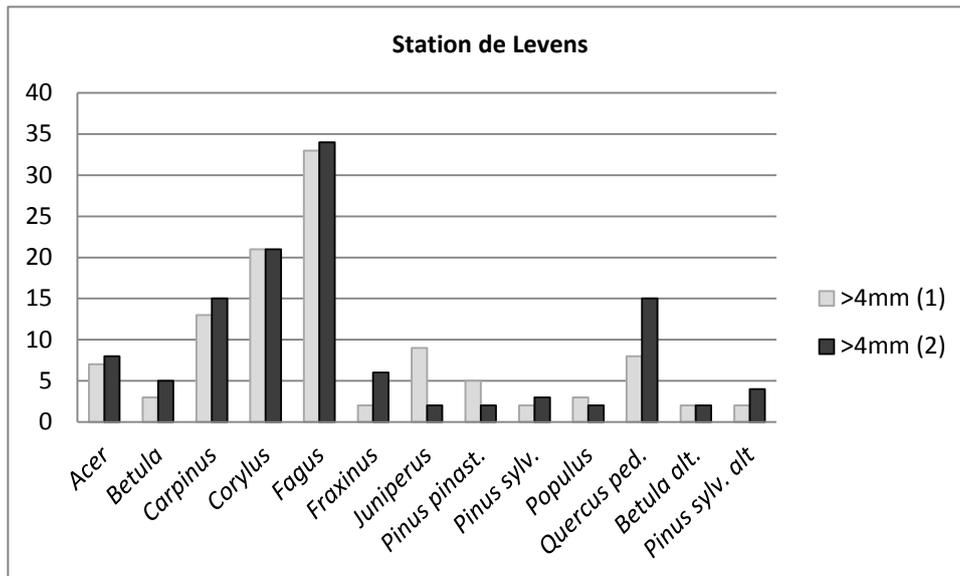


Figure 63 : Nombre de Fragments >4mm dans les deux cellules de la station de Levens

Le test de Kruskal Wallis (fig. 64) indique que la fragmentation des taxons présente des différences statistiques significatives (p-value inférieure au seuil alpha 0.05).

En incluant toutes les classes de taille de fragments, la procédure de comparaisons multiples par paires (procédure de Dunn, test bilatéral ; n=6 par taxon), met en évidence des différences significatives entre *Betula altéré*, *Populus*, *Fraxinus* et *Pinus pinaster* (fragmentation réduite) d'une part et *Fagus* (fragmentation importante) d'autre part. Les autres taxons ne sont pas distingués (fig. 65).

K	42.199
p-value (bilatérale)	< 0.0001
alpha	0.05

Figure 64 : Test de Kruskal Wallis

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes	
<i>Betula alt.</i>	6	121.500	20.250	A	
<i>Populus</i>	6	127.500	21.250	A	
<i>Fraxinus</i>	6	133.000	22.167	A	
<i>Pinus pinaster</i>	6	144.500	24.083	A	
<i>Pinus sylvestris alt.</i>	6	175.000	29.167	A	B
<i>Betula</i>	6	194.500	32.417	A	B
<i>Pinus sylvestris</i>	6	211.000	35.167	A	B
<i>Juniperus</i>	6	244.500	40.750	A	B
<i>Acer</i>	6	246.000	41.000	A	B
<i>Quercus ped.</i>	6	322.000	53.667	A	B
<i>Carpinus</i>	6	348.000	58.000	A	B
<i>Corylus</i>	6	385.500	64.250	A	B
<i>Fagus</i>	6	428.000	71.333		B

Figure 65 : Comparaisons multiples par paires. Procédure de Dunn, test bilatéral (niveau de significativité corrigé de Bonferroni = 0.0006)

- *Classement des taxons en fonction du nombre de fragments produits par classe de taille ([1-2mm],]2-4mm], >4mm)*

Les classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) fondées sur les distances euclidiennes (méthode de Ward) et réalisées par classe de taille de fragments, ne permettent dans aucun des cas de distinguer le lot d'espèces à fragmentation réduite mis en évidence par la procédure de Dunn. Par contre, *Fagus* se différencie et constitue une catégorie à part entière quelle que soit la taille de fragments considérée. Quatre autres taxons (*Carpinus*, *Corylus*, *Quercus*, *Pinus sylvestris* altéré) se distinguent par une fragmentation plus élevée dans certaines classes de taille comme cela était visible sur les histogrammes (fig. 61 à 63).

Dans la classe]1-2mm], *Fagus* constitue le groupe 3, dont la fragmentation est la plus élevée, *Corylus* et *Quercus* (groupe 2) produisent moins de fragments que *Fagus*, mais plus que tous les autres taxons (fig. 66 à 68). Ceux-ci (*Acer*, *Betula*, *Carpinus*, *Fraxinus*, *Juniperus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Populus*, *Betula* altéré et *Pinus sylvestris* altéré) composent le dernier groupe (groupe 1) peu différencié (inertie faible : fig. 66), dont la fragmentation est plus réduite. D'après le profil des groupes (fig. 68), les trois lots de taxons mis en évidence (*Fagus* / *Corylus* et *Quercus* / tous les autres taxons) sont bien distingués.

Si l'on observe le nombre de fragments de la classe de taille médiane [2-4mm], *Fagus* (groupe 3) se différencie largement du reste de taxons (fig. 69). *Corylus*, *Carpinus* et *Pinus sylvestris* altéré (groupe 2) se distinguent par une fragmentation plus élevée que le reste des taxons. *Quercus* n'est pas distingué dans la classe [2-4mm], il rejoint le groupe à fragmentation basse comprenant tous les autres taxons (groupe 1 : *Acer*, *Betula*, *Fraxinus*, *Juniperus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Populus*, *Betula* altéré ; fig. 69 et 70). Les groupes sont bien différenciés (fig. 71)

Dans la classe de taille >4mm (fig. 72 et 73), *Fagus* constitue à nouveau le groupe supérieur (groupe 3) dont la fragmentation est la plus importante. *Carpinus*, *Corylus* et *Quercus pedunculata* (groupe 2) se distinguent du reste des taxons, qui composent la catégorie la plus basse (groupe 1). Les trois groupes sont bien différenciés (fig. 74)

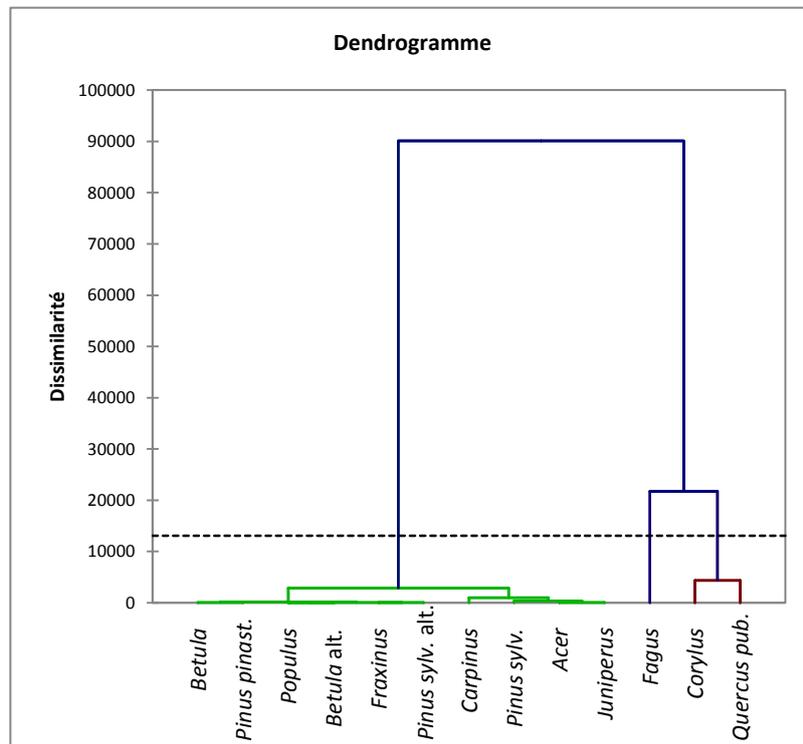


Figure 66 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments [1-2mm] à Levens

Groupe	1	2	3
Objets	10	2	1
Somme des poids	10	2	1
Variance intra-classe	498.811	4326.500	0.000
Distance minimale au barycentre	7.360	46.511	0.000
Distance moyenne au barycentre	18.832	46.511	0.000
Distance maximale au barycentre	44.873	46.511	0.000
	<i>Acer</i>	<i>Corylus</i>	<i>Fagus</i>
	<i>Betula</i>	<i>Quercus ped.</i>	
	<i>Carpinus</i>		
	<i>Fraxinus</i>		
	<i>Juniperus</i>		
	<i>Pinus pinast.</i>		
	<i>Pinus sylv.</i>		
	<i>Populus</i>		
	<i>Betula alt.</i>		
	<i>Pinus sylv. alt.</i>		

Figure 67 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments]1-2mm])

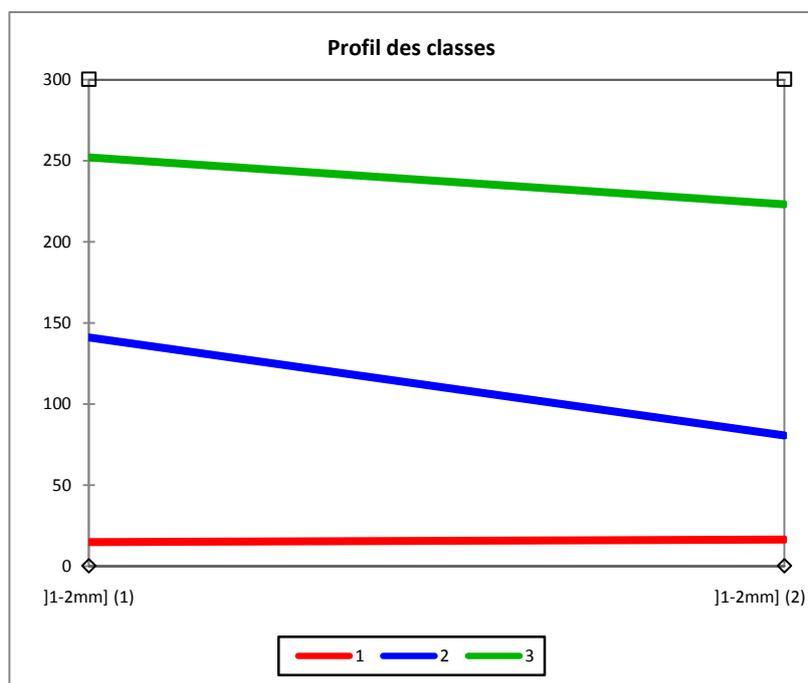


Figure 68 : Profil des groupes (fragments]1-2mm])

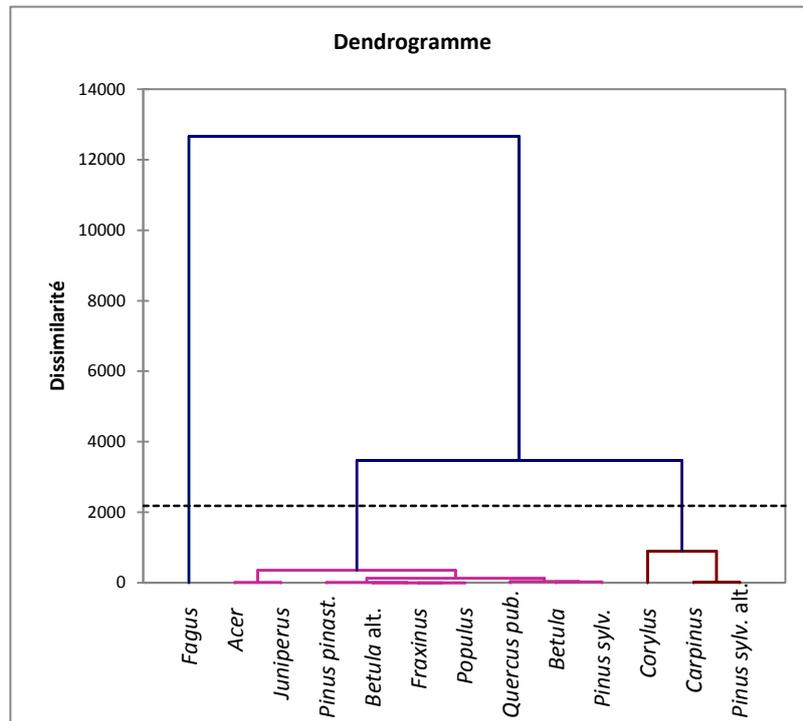


Figure 69 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments [2-4mm]

Classe	1	2	3
Objets	9	3	1
Somme des poids	9	3	1
Variance intra-classe	67.028	451.000	0.000
Distance minimale au barycentre	4.407	11.662	0.000
Distance moyenne au barycentre	7.022	16.389	0.000
Distance maximale au barycentre	13.771	24.352	0.000
	<i>Acer</i>	<i>Carpinus</i>	<i>Fagus</i>
	<i>Betula</i>	<i>Corylus</i>	
	<i>Fraxinus</i>	<i>Pinus sylv. alt.</i>	
	<i>Juniperus</i>		
	<i>Pinus pinast.</i>		
	<i>Pinus sylv.</i>		
	<i>Populus</i>		
	<i>Quercus ped.</i>		
	<i>Betula alt.</i>		

Figure 70 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments [2-4mm])

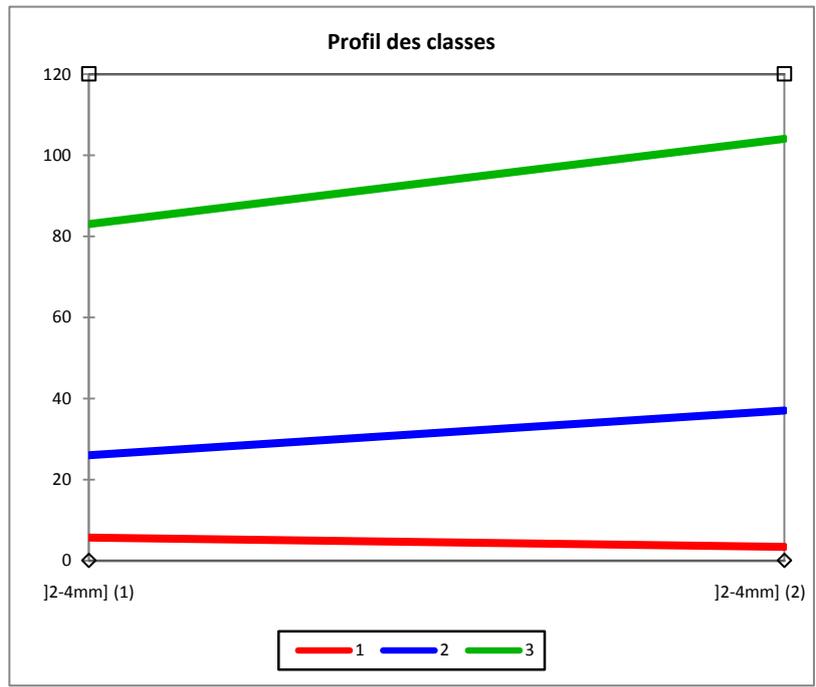


Figure 71 : Profil des groupes (fragments]2-4mm])

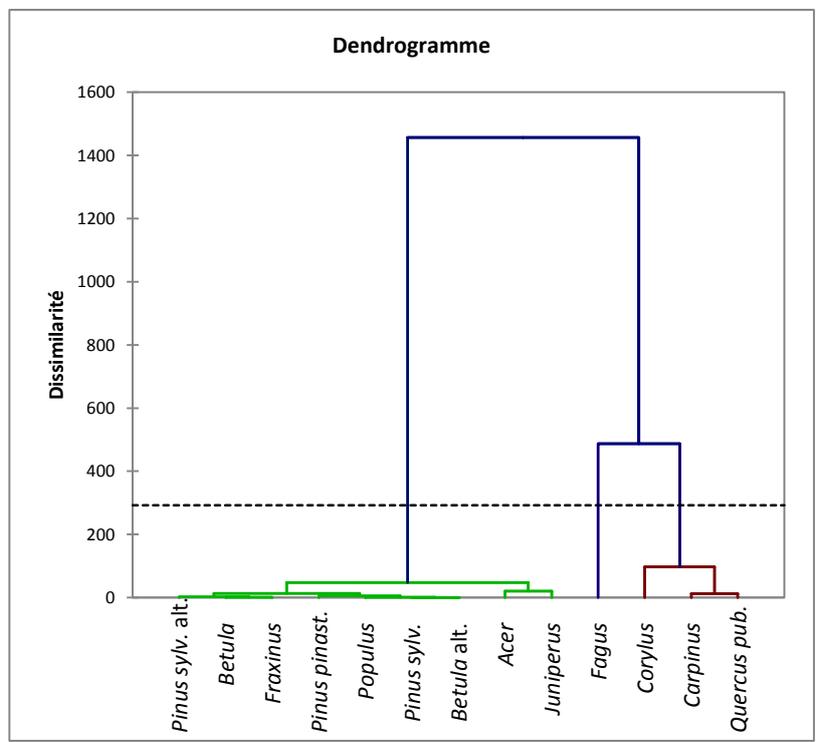


Figure 72 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments >4mm

Groupe	1	2	3
Objets	9	3	1
Somme des poids	9	3	1
Variance intra-classe	11.306	55.000	0.000
Distance minimale au barycentre	1.511	2.236	0.000
Distance moyenne au barycentre	2.856	5.541	0.000
Distance maximale au barycentre	5.411	8.062	0.000
	<i>Acer</i>	<i>Carpinus</i>	<i>Fagus</i>
	<i>Betula</i>	<i>Corylus</i>	
	<i>Fraxinus</i>	<i>Quercus ped.</i>	
	<i>Juniperus</i>		
	<i>Pinus pinast.</i>		
	<i>Pinus sylv.</i>		
	<i>Populus</i>		
	<i>Betula alt.</i>		
	<i>Pinus sylv. alt.</i>		

Figure 73 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments >4mm)

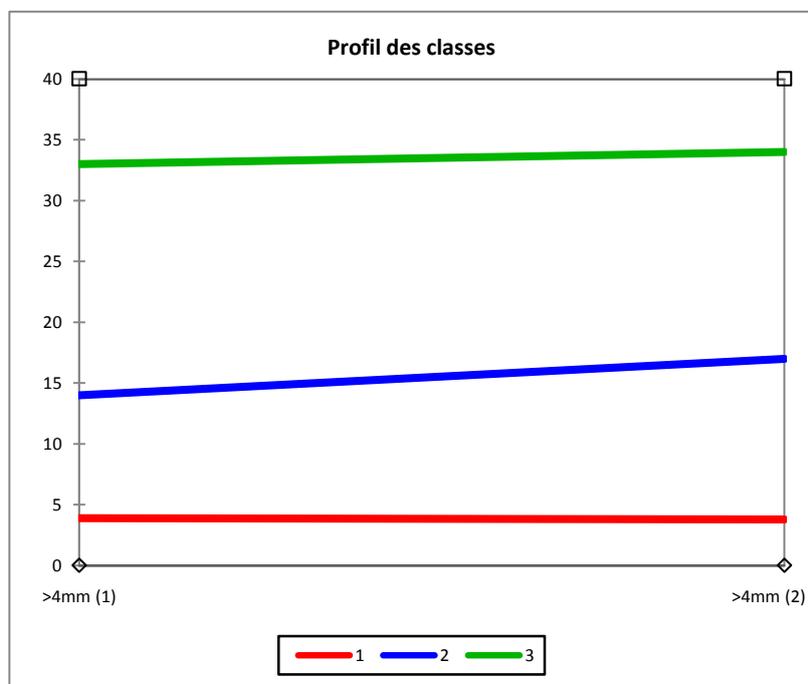


Figure 74 : Profil des groupes (fragments >4mm)

I.3.3.2. Station de Valbonne

- *Distribution des fragments par classe de taille*

Dans la station de Valbonne, la fragmentation est beaucoup plus réduite et ne suit pas la relation inversement proportionnelle aux classes de taille (fig. 75) mise en évidence à Levens (fig. 60). Tous taxons confondus, la moyenne du nombre de fragments dans la classe]2-4mm] est de 1.8, elle est inférieure à celle de la classe >4mm (3.2). La classe]1-2mm] compte en moyenne 7.6 fragments (tableau 23).

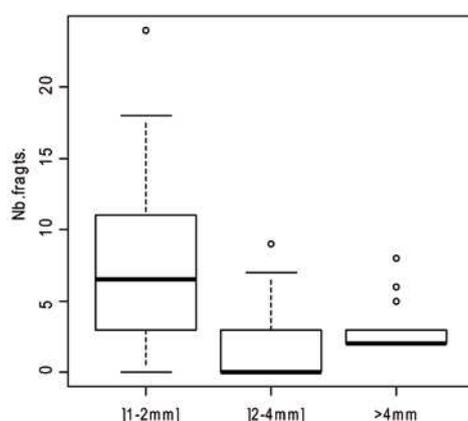


Figure 75 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille dans la station de Valbonne

Statistiques descriptives	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm
Minimum	0	0	2
Maximum	24	9	8
Moyenne	7.6	1.8	3.2
Médiane	6.5	0	2
Écart-type (n)	5.975	2.883	1.875
Coefficient de variation	0.789	1.595	0.594

Tableau 23 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille à Valbonne (tous taxons et lots confondus)

Dans la classe]1-2mm] le nombre de fragments varie selon les taxons entre 0 et 24. La classe intermédiaire]2-4mm] comprend de 0 à 9 fragments et la dernière classe (>4mm) compte de 2 à 8 fragments.

- *Nombre de fragments par classe de taille : différences taxonomiques*

Malgré une fragmentation globalement réduite, *Fagus*, *Populus*, *Quercus pedunculata* et *Pinus sylvestris* altéré se détachent dans la classe inférieure]1-2mm] (fig. 76). Bien que la classe intermédiaire soit très peu fournie, les mêmes taxons que dans la classe inférieure ainsi que *Corylus* et dans une moindre mesure *Betula* altéré, comptent quelques fragments dans au moins un des deux lots de charbons (fig. 77). Dans la classe supérieure à >4mm, les deux fragments initialement déposés sont retrouvés intacts pour la plupart des essences. Seul *Quercus pedunculata* présente une fragmentation légèrement plus importante dans les deux lots, tandis que *Corylus*, *Fagus* et *Populus* se sont surtout fragmentés dans le premier lot et *Fraxinus* dans le second (fig. 78).

Une partie de cette fragmentation qui ne se produit que dans un des lots peut être assimilée à des aléas. Il est toutefois remarquable que les taxons les plus fragmentés dans la station de Levens le soit aussi à Valbonne malgré une réaction du matériel bien moins prononcée.

Le test de Kruskal Wallis (fig. 79) indique bien que des différences significatives existent entre les taxons, toutefois, la procédure de comparaisons par paires associée à la correction de Bonferroni (fig. 80) ne laisse apparaître qu'un seul groupe homogène.

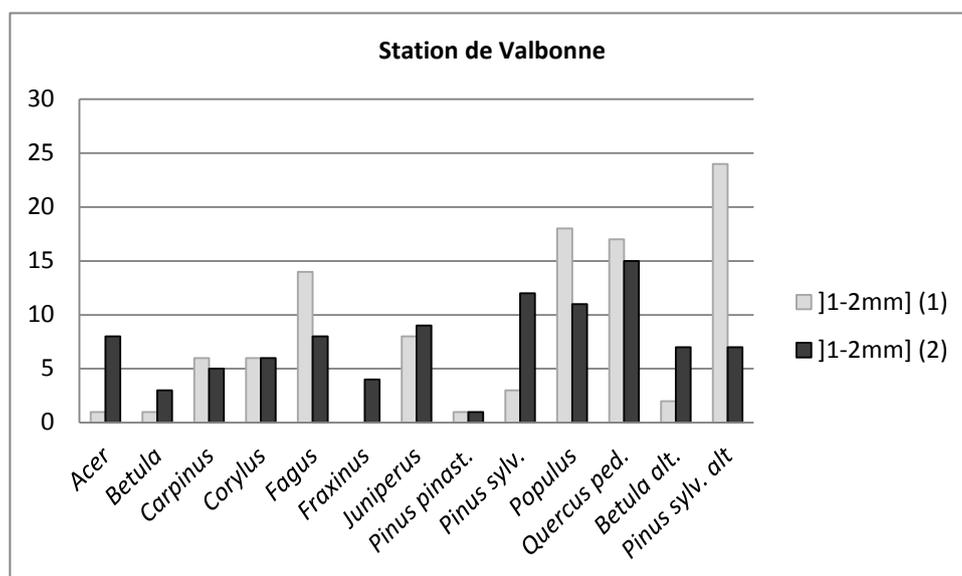


Figure 76 : Nombre de Fragments]1-2mm] dans les deux cellules de la station de Valbonne

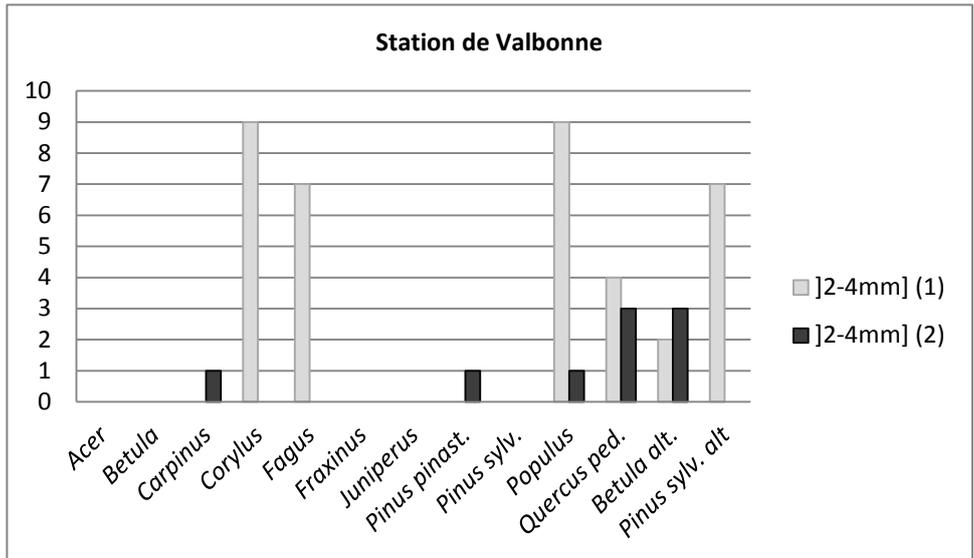


Figure 77 : Nombre de Fragments]2-4mm] dans les deux cellules de la station de Valbonne

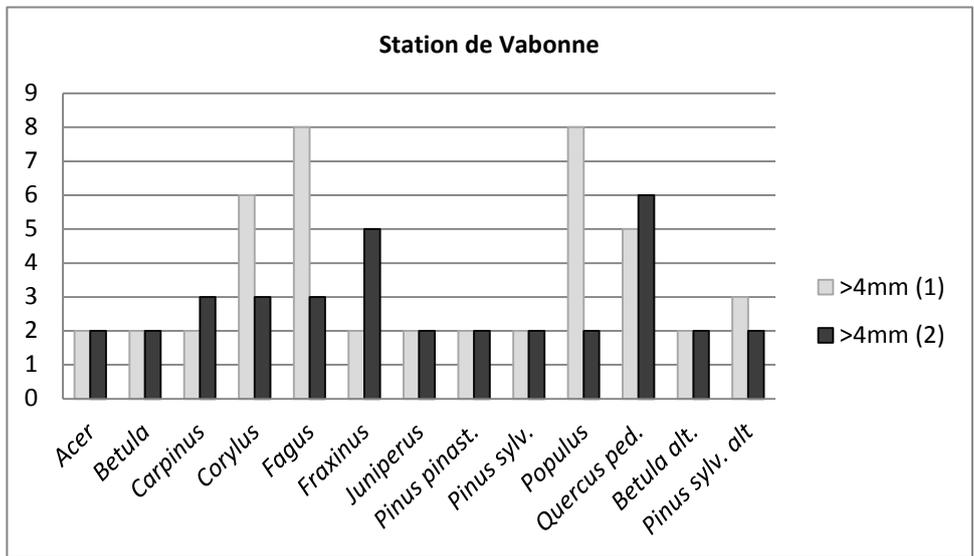


Figure 78 : Nombre de Fragments >4mm dans les deux cellules de la station de Valbonne

K	22.882
p-value (bilatérale)	0.016
alpha	0.05

Figure 79 : Test de Kruskal Wallis

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes
<i>Pinus pinaster</i>	6	133.500	22.250	A
<i>Betula</i>	6	147.500	24.583	A
<i>Fraxinus</i>	6	161.500	26.917	A
<i>Acer</i>	6	168.000	28.000	A
<i>Pinus sylvestris</i>	6	200.500	33.417	A
<i>Carpinus</i>	6	216.500	36.083	A
<i>Juniperus</i>	6	218.000	36.333	A
<i>Betula alt.</i>	6	237.000	39.500	A
<i>Pinus sylvestris alt.</i>	6	287.500	47.917	A
<i>Corylus</i>	6	295.000	49.167	A
<i>Fagus</i>	6	321.500	53.583	A
<i>Populus</i>	6	337.500	56.250	A
<i>Quercus pedunculata</i>	6	357.000	59.500	A

Figure 80 : Comparaisons multiples par paires (Procédure de Dunn, test bilatéral. Niveau de signification corrigée de Bonferroni : 0.0006)

- *Classement des taxons en fonction du nombre de fragments produits par classe de taille ([1-2mm],]2-4mm], >4mm)*

La réalisation des classifications ascendantes hiérarchiques permet d'observer un peu plus en détail le processus de fragmentation bien qu'il soit ici minime.

La classe]1-2mm] est traitée indépendamment, en revanche, la classe]2-4mm] étant extrêmement peu représentées (tableau 23 et fig. 77), nous l'avons regroupée avec la classe >4mm dans une seconde classification.

S'agissant de la production de petits fragments, trois groupes sont bien différenciés (fig. 83). Le premier est constitué de *Fagus*, *Populus*, *Quercus pedunculata* et *Pinus sylvestris* altéré (groupe 3) qui produisent plus de fragments que la moyenne des taxons (fig. 81 et 82). Le groupe 2 comprend *Betula*, *Fraxinus* et *Pinus pinaster* qui ont une fragmentation quasi nulle dans les deux lots expérimentaux. Le reste des taxons (groupe 1 : *Acer*, *Carpinus*, *Corylus*, *Juniperus*, *Pinus sylvestris*, *Betula* altéré) produit légèrement plus de petits fragments que ceux du groupe 2 au moins dans un des deux lots, ils constituent la dernière catégorie (fig. 81 et 82).

Si l'on considère les deux classes supérieures de fragments (]2-4mm], >4mm), *Quercus*, *Corylus*, *Fagus*, *Populus* et *Pinus sylvestris* altéré (groupe 2 ; fig. 84, 85) produisent un peu plus de fragment que toutes les autres essences dans au moins un des deux lots (fig. 86). Les

autres taxons (groupe 1 : *Acer*, *Betula*, *Carpinus*, *Fraxinus*, *Juniperus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Betula* altéré) ne se fragmentent quasiment pas dans l'un et l'autre des lots ; les deux fragments initialement déposés sont retrouvés presque intacts dans la plupart des cas. Ces essences ne produisent ni gros, ni fragments de taille moyenne et seulement quelques petits fragments détachés du corps du charbon.

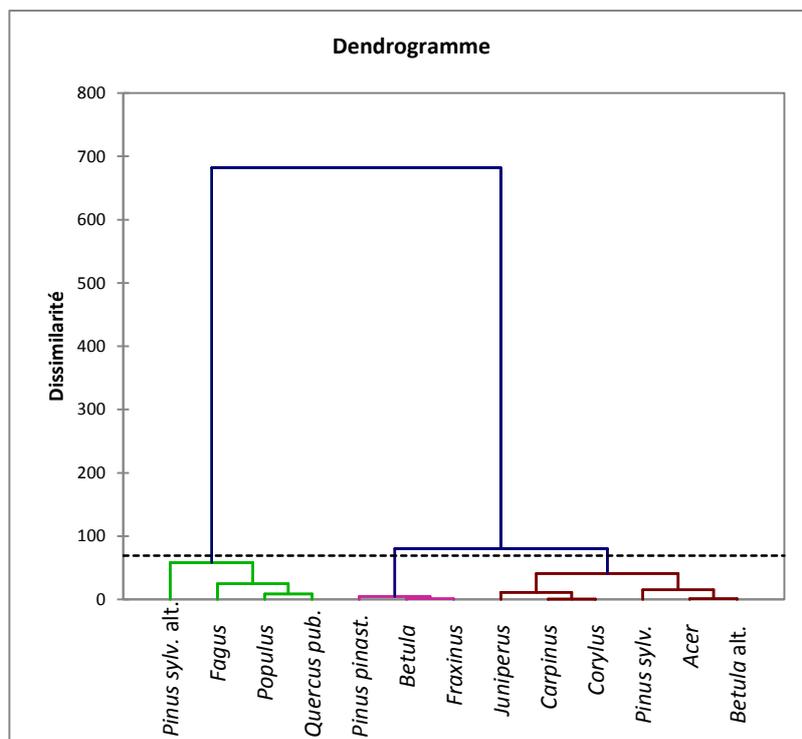


Figure 81 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments [1-2mm]

Groupe	1	2	3
Objets	6	3	4
Somme des poids	6	3	4
Variance intra-classe	13.633	2.667	30.500
Distance minimale au barycentre	2.478	0.471	0.791
Distance moyenne au barycentre	3.300	1.221	4.279
Distance maximale au barycentre	4.375	1.700	6.605
	<i>Acer</i>	<i>Betula</i>	<i>Fagus</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Fraxinus</i>	<i>Populus</i>
	<i>Corylus</i>	<i>Pinus pinast.</i>	<i>Quercus ped.</i>
	<i>Juniperus</i>		<i>Pinus sylv. alt.</i>
	<i>Pinus sylv.</i>		
	<i>Betula alt.</i>		

Figure 82 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments [1-2mm])

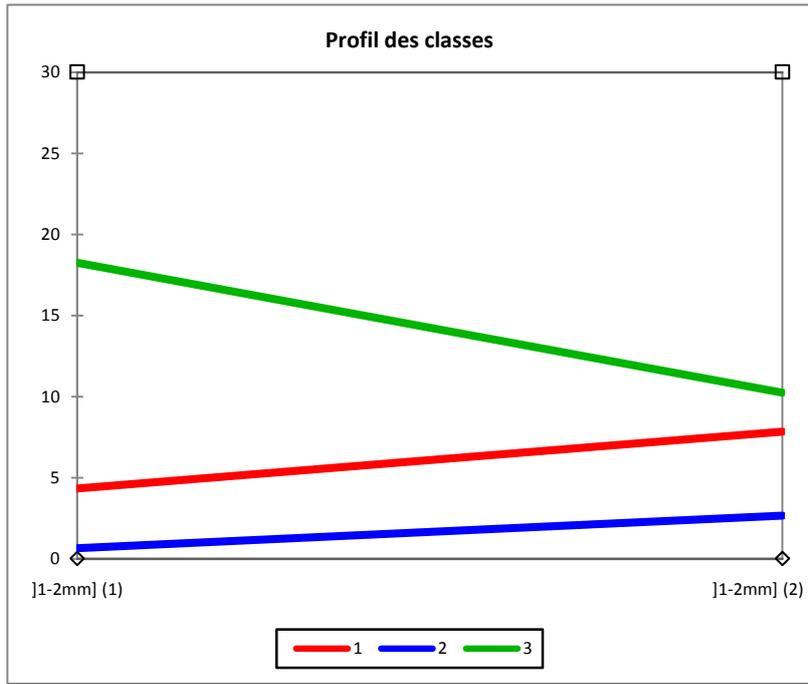


Figure 83 : Profil des groupes (fragments]1-2mm])

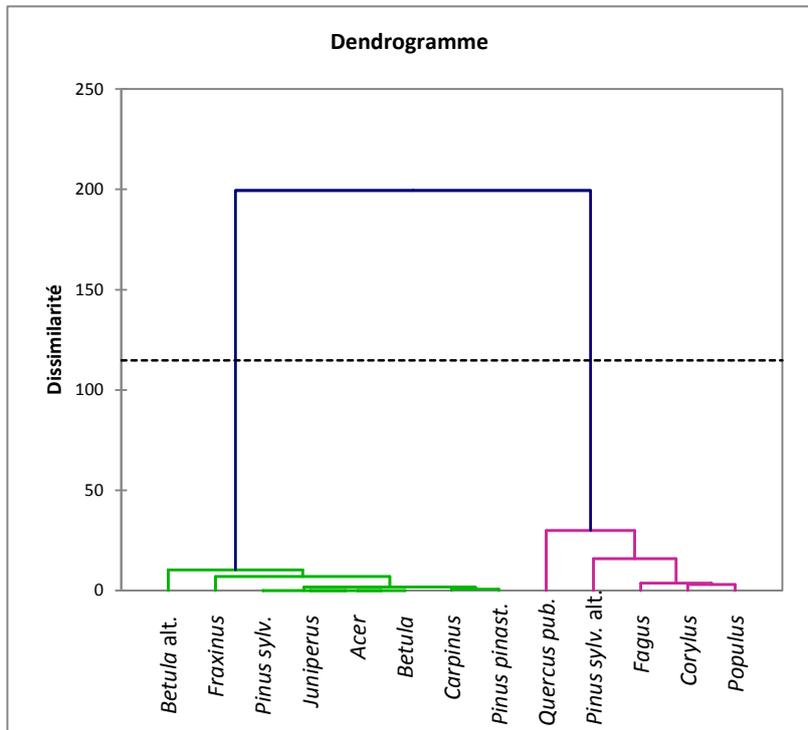


Figure 84 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments]2-4mm] et >4mm

Classe	1	2
Objets	8	5
Somme des poids	8	5
Variance intra-classe	2.768	13.100
Distance minimale au barycentre	0.673	1.980
Distance moyenne au barycentre	1.285	3.066
Distance maximale au barycentre	2.992	4.891
	<i>Acer</i>	<i>Corylus</i>
	<i>Betula</i>	<i>Fagus</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Populus</i>
	<i>Fraxinus</i>	<i>Quercus ped.</i>
	<i>Juniperus</i>	<i>Pinus sylv. alt.</i>
	<i>Pinus pinast.</i>	
	<i>Pinus sylv.</i>	
	<i>Betula alt.</i>	

Figure 85 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments]2-4mm] et >4mm)

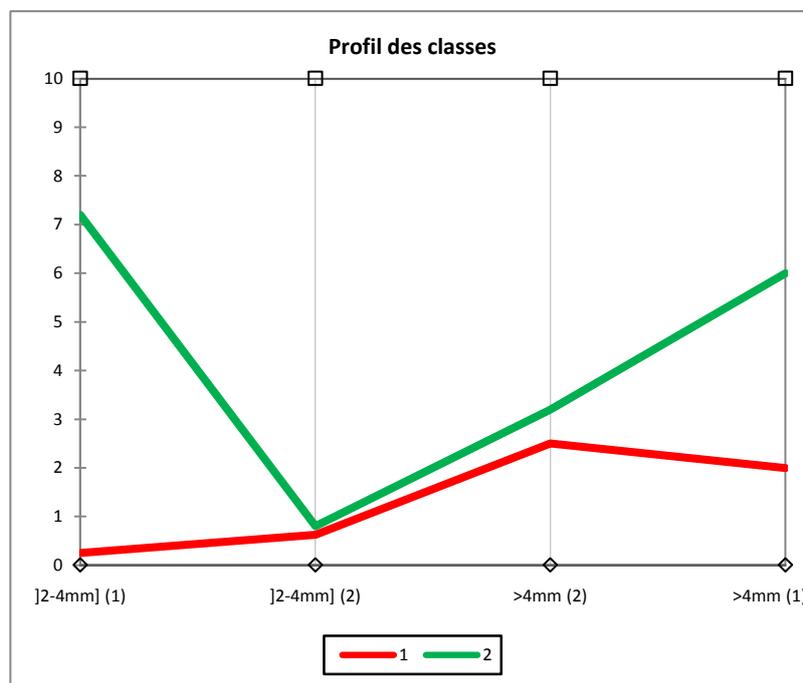


Figure 86 : Profil des groupes (fragments]2-4mm] et >4mm)

I.3.5. Mode de fragmentation des taxons dans les deux stations

Comme dans l'expérimentation précédente, il est possible d'interpréter en partie les données de l'analyse en termes de mode fragmentation des taxons.

À Levens,

- *Fagus*, *Quercus* et *Corylus* se fragmentent dans la masse du charbon (production importante de gros fragments) et sont sujet à un effritement important depuis la périphérie des fragments (production de nombreuses particules <2mm).
- Inversement, *Betula*, *Pinus sylvestris*, *Juniperus* et *Acer* se fragmentent peu et *Betula* altéré, *Populus*, *Fraxinus* et *Pinus pinaster* quasiment pas, dans la masse comme depuis la périphérie des fragments.
- *Carpinus* s'effrite peu, par contre il se distingue dans les deux classes de taille supérieure par sa fragmentation relativement importante dans la masse.
- Le cas de *Pinus sylvestris* altéré est particulier. Il présente peu de gros fragments et aucun petit, mais un nombre relativement important de fragments moyens. Cela semble correspondre au détachement, non pas de petits fragments (ce que l'on appelle ici « effritement »), mais de particules un peu plus importantes (comprises entre 2 et 4mm) depuis la périphérie du fragment, processus qui n'induit pas une réelle fragmentation dans la masse (absence de gros fragments).
- *Quercus* en revanche présente beaucoup de petits et de gros fragments et peu de moyens. Il subit donc des ruptures dans la masse, lesquelles génèrent la production de petits fragments par effritement des nouvelles surfaces créées. Les gros fragments produits restent cependant relativement compacts et solidaires, sans détachement de plus grosses particules (fragments 2 à 4mm).

À Valbonne,

- Seul *Quercus* subi une fragmentation dans la masse dans les deux cellules expérimentales. *Fagus*, *Corylus* et *Populus* produisent plus de gros fragments que les autres taxons, mais seulement dans le premier lot expérimental.
- *Fagus*, *Populus* et *Quercus* sont également sujets à un effritement de la surface des fragments, contrairement à *Corylus* qui n'est pas distingué dans cette classe.

- Le cas de *Pinus sylvestris* altéré est ici aussi singulier. Il ne subit pas de fragmentation dans la masse au sens de la production de gros fragments, mais présente à nouveau un nombre de fragments moyens relativement important (comparativement aux autres taxons), associé cette fois-ci à un effritement de la périphérie. La production de fragments]2-4mm] semble donc bien le fruit d'un détachement de particules depuis la périphérie dans le cas de ce taxon.
- Enfin, comme à Levens, *Acer*, *Betula* altéré, *Betula*, *Fraxinus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Juniperus*, mais aussi *Carpinus* dans cette station, sont peu fragmentés dans la masse, et ne s'effritent peu ou pas.
Ces derniers taxons sont donc peu sensibles aux agents météoriques en jeu.

I.3.6. Facteurs incidents sur la fragmentation

Nous avons testé l'incidence des caractéristiques physiques des taxons (« P indice » - différence de porosité bois initial/bois final –, « P globale » – porosité globale des échantillons –, « MV » – masse volumique –) et des fragments initialement déposés (« V » - volume –) sur la fragmentation dans chaque station. Celles-ci ne sont pas caractérisées par les mêmes conditions thermiques et hygrométriques et il est possible que les variables testées agissent différemment dans l'un et l'autre contexte expérimental ; nous traitons donc les résultats de chaque station séparément de manière à pouvoir mettre en évidence une éventuelle variabilité des réactions observées.

Le test de corrélation de Spearman indique qu'il existe dans la station de Levens un lien entre le nombre de fragments produits et le volume initial des fragments (fig. 87) ; 20% de la variation du nombre de fragments est expliqué par la variable volume d'après ce test (fig. 88).

Variables	V	MV	P	P globale	Nb. Fragts
V	1	0.279	0.145	-0.310	0.447
MV	0.279	1	0.251	-0.480	0.272
P	0.145	0.251	1	-0.104	0.328
Porosité générale	-0.310	-0.480	-0.104	1	0.114
Nb. Fragts	0.447	0.272	0.328	0.114	1

Figure 87 : Matrice des corrélations de Spearman (les valeurs en gras sont différentes de zéro à un seuil significatif alpha 0.05) pour la station de Levens

Variables	V	MV	P	P globale	Nb. Fragts
V	1	0.078	0.021	0.096	0.200
MV	0.078	1	0.063	0.230	0.074
P	0.021	0.063	1	0.011	0.108
P globale	0.096	0.230	0.011	1	0.013
Nb. Fragts	0.200	0.074	0.108	0.013	1

Figure 88 : Coefficients de détermination de Spearman pour la station de Levens. Liens entre les variables (V : Volume des fragments déposés ; MV : Masse Volumique des fragments déposés ; P : indice de porosité des taxons ; Nb. Fragts. : Nombre de fragments final après dépôt)

Dans la station de Valbonne, la corrélation entre le volume des fragments initialement déposés et le nombre de fragments obtenus à l'issue du dépôt n'est pas mis en évidence, en revanche, **la porosité globale est fortement corrélée au nombre de fragments produits** (fig. 89). Le lien entre ces deux variables est de 45.4% (fig. 90).

Variables	V	MV	P indice	P globale	Nb. Fragts
V	1	-0.003	-0.125	-0.189	0.111
MV	-0.003	1	0.203	-0.550	-0.313
P	-0.125	0.203	1	-0.104	0.144
Porosité générale	-0.189	-0.550	-0.104	1	0.674
Nb. Fragts	0.111	-0.313	0.144	0.674	1

Figure 89 : Matrice des corrélations de Spearman (les valeurs en gras sont différentes de zéro à un seuil significatif alpha 0.05) pour la station de Valbonne

Variables	V	MV	P	P globale	Nb. Fragts
V	1	0.000	0.016	0.036	0.012
MV	0.000	1	0.041	0.302	0.098
P indice	0.016	0.041	1	0.011	0.021
P globale	0.036	0.302	0.011	1	0.454
Nb. Fragts	0.012	0.098	0.021	0.454	1

Figure 90 : Coefficients de détermination de Spearman pour la station de Valbonne. Liens entre les variables (V : Volume des fragments déposés ; MV : Masse Volumique des fragments déposés ; P : indice de porosité des taxons ; Nb. Fragts. : Nombre de fragments final après dépôt)

Les tests de puissances réalisés indiquent que la probabilité pour que la **liaison entre porosité globale et fragmentation à Valbonne soit vraie est de 83%**, tandis que la puissance du test ne s'élève qu'à **55% pour la corrélation entre volume et fragmentation à Levens**.

Il faut également noter la corrélation négative mise en évidence entre la porosité globale et la masse volumique ; ce lien indique que les essences les plus poreuses sont les moins denses et inversement. En effet, les essences à zone poreuses telles *Fraxinus*, *Carpinus* ou *Betula* ont un indice de porosité (différence de porosité entre le bois initial et le bois final) élevé, mais leur porosité globale (bois initial et final confondu) est moins importante que des

espèces homoxylées ou à répartition très diffuse des vaisseaux telles *Juniperus*, *Populus* ou encore *Pinus sylvestris* (en particulier sous sa forme altérée). Ces dernières essences présentent une masse volumique beaucoup moins élevée que le premier lot d'espèces mentionné. Les autres taxons présentent une porosité globale et/ou une masse volumique moyenne qui leur donne peu de poids dans la liaison mise en évidence.

Cette corrélation est de 23% dans la station de Levens, soit un lien légèrement plus important que celui qui apparaît entre le volume et la fragmentation (20%, fig. 88). Il semble donc que, de la même manière, cette dernière corrélation ne concerne qu'une partie des essences ; ceci est confirmé par le graphique de nuage de points (annexe IV.1.2.). Inversement, la relation entre porosité globale et fragmentation, bien qu'elle comporte également des exceptions (notamment *Juniperus*), est relativement monotone (voir nuage de points en annexe IV.1.2.).

I.4. Synthèse et discussion : sensibilité aux agents météoriques

À l'issue de cet essai de météorisation nous pouvons retenir que :

- ✓ **la fragmentation du matériel est très inégale entre les stations comme entre les taxons** : elle est très importante à très réduite selon les taxons à Levens et minime à Valbonne. Toutefois, une partie des taxons sur lesquels les effets des conditions de dépôts se sont fait sentir à Valbonne, même de manière atténuée, sont les mêmes qu'à Levens ; il s'agit de *Fagus sylvatica*, *Quercus pedunculata* et *Pinus sylvestris* altéré. **Ces taxons sont donc plus sensibles aux agents météoriques en jeu**
- ✓ la principale **différence entre les deux stations** concerne le comportement de *Populus alba* qui est parmi les essences non fragmentées à Levens et qui se fragmente plus que la moyenne dans un des deux lots de Valbonne. Inversement, *Corylus avellana* et *Carpinus betulus*, qui sont statistiquement différenciés à Levens ne le sont pas à Valbonne
- ✓ enfin, *Acer*, *Betula* altéré, *Betula*, *Fraxinus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* et *Juniperus*, **ne sont que très peu, voire pas altérés**, par les conditions de dépôt dans l'une comme dans l'autre des stations

- ✓ un **lien relativement élevé entre porosité globale et fragmentation** est mis en évidence dans la station de **Valbonne**

Seules les conditions météorologiques varient dans la mise en œuvre de l'expérimentation entre les deux stations. La variation du comportement des échantillons doit donc pouvoir être expliquée par les différences de conditions de dépôt, qui ont un impact bien plus important à Levens. Cette station est plus froide, venteuse et sèche, tandis que celle de Valbonne est plus chaude et humide (les mousses qui se sont développées à la surface des charbons dans cette station dénotent bien d'une humidité persistante).

Les basses températures, une amplitude thermique plus élevée et des alternances humidification/séchage sans doute plus fréquentes et rapides (caractéristiques de la station de Levens) ont donc un effet plus important sur les charbons de bois que leur humidification associée à des variations thermiques de moindre importance et des températures plus élevées (station de Valbonne).

Du point de vue taxonomique, ***Fagus* est l'essence qui produit le plus de fragments quelle que soit la classe de taille considérée et quelle que soit la station** ; ce taxon semble donc **particulièrement sensible à la météorisation** alors qu'il se démarquait moins dans les expériences précédentes. De même, *Pinus sylvestris* altéré et *Populus* sont distingués ici pour la première fois. Le cas de *Populus* est difficile à interpréter car il ne se fragmente que dans l'un des deux lots de Valbonne, et il ne se distingue des autres taxons que du fait de la très faible fragmentation générale dans cette station. Son comportement dans un seul des échantillons peut être vu comme aléatoire, mais témoigne peut-être aussi de la plus grande sensibilité de ce taxon à l'humidité persistante et au taux de précipitations plus élevé de la station de Valbonne. *Pinus sylvestris* altéré semble présenter un mode de fragmentation particulier se produisant par détachement de grosses particules depuis la périphérie du fragment. La corrélation mise en évidence entre la porosité globale des taxons et leur fragmentation suite à leur exposition aux agents atmosphériques explique en partie la réaction du pin sylvestre sous sa forme altérée, ainsi que celle de *Populus* aux côtés d'espèces plus denses comme *Fagus*, *Quercus* et *Corylus*, la densité n'étant pas ici un facteur déterminant du comportement des essences.

II. EFFETS DES CYCLES DE RETRAIT-GONFLEMENT DU SÉDIMENT SUR LES CHARBONS DE BOIS

II.1. Introduction

Parmi les processus mécaniques pouvant potentiellement produire l'altération et la fragmentation des charbons de bois, il faut compter les alternances de retrait et de gonflement du sédiment, qui s'opèrent dans les sols fins et en particulier lorsque la teneur en argiles est importante. Les phénomènes de retrait-gonflement du sol génèrent des pressions (négatives – succion – ou de gonflement) pouvant atteindre plusieurs mégapascal qui contribuent à altérer et/ou fragmenter les matériaux contenus dans et à la surface des sols.

Le terme argile désigne une classe granulométrique (les particules inférieures à $2\mu\text{m}$) et une nature minéralogique (la famille des phyllosilicates). Les argiles présentent une structure cristalline particulière en feuillets, eux-mêmes constitués d'une superposition alternée de silicates et d'alumine. Les groupes de feuillets (particules) et les feuillets sont liés entre eux par des forces électriques variables selon la nature minérale. L'absorption d'eau entre les particules (interparticulaire) ou entre les feuillets (interfoliaire) entraîne le gonflement (augmentation de volume) des argiles. Le gonflement interfoliaire est spécifique à la famille de montmorillonites et en particulier aux smectites (dites « argiles gonflantes »), il est d'une amplitude bien supérieure au gonflement interparticulaire qui affecte toutes les familles d'argiles. Inversement, la perte d'eau entraîne une diminution de volume, c'est le phénomène de retrait; dans les sols, il crée un tassement vertical et des fissures horizontales. Le matériau argileux est dur et cassant lorsque la teneur en eau est faible et très plastique lorsque la teneur en eau est élevée. La capacité de déformation des argiles dépend donc de la nature minéralogique, de la teneur en eau, mais aussi de l'état de compaction et de contrainte du matériau. S'il est très compact, la porosité, et donc la capacité d'absorption d'eau diminue. Par ailleurs, si l'état de contrainte est modifié (ajout ou enlèvement de charge par exemple), un nouvel équilibre se crée, entraînant un tassement ou un soulèvement (changement de volume) du sol. Les sables et les limons sableux

présentent également des cycles de retrait et de gonflement suivant les fluctuations de leur teneur en eau, mais de moindre amplitude.

Les pressions qui s'exercent lors des cycles de retrait-gonflement du sédiment mettent en jeu des forces de compression, mais aussi de traction et de cisaillement et, à terme, si les cycles se répètent, un phénomène d'usure du matériau. Comme les alternances gel-dégel, il est possible que les cycles de retrait et de gonflement du sédiment, et les pressions qu'ils génèrent, contribuent à fragmenter les charbons de bois. De manière à tester la réaction du matériel anthracologique aux effets des alternances d'absorption et de perte d'eau d'un sédiment limono-argileux, une première expérimentation a été mise en œuvre entre mars 2010 et octobre 2012.

II.2. Protocole expérimental (cf. planche 9, annexe IV.2.)

II.2.1. Matrice sédimentaire, composition et montage du dispositif expérimental

La matrice sédimentaire utilisée est la même que lors des tests de gel-dégel (cf. chapitre IV, § II.1.2.). Il s'agit de marnes pliocènes majoritairement composées de limons (78.88%) et d'argiles (20.5%) (tableau 11), parmi lesquelles les smectites sont dominantes (environ huit dixième). Au départ de l'expérimentation, deux litres de sédiments ont été mélangés à un litre d'eau jusqu'à obtention d'une pâte visqueuse.

Des boîtes plastiques (« Boîtes L.A.B. » 18 x 11.9 x 7.2cm) sont utilisées pour recevoir la matrice sédimentaire et les charbons de bois. Une première couche de sédiment imbibé d'eau est coulée et tassée au fond des boîtes. Après avoir été partiellement séchée, cette première couche est saupoudrée de sable rouge. Une seconde couche de sédiment imbibé d'eau est coulée, les charbons y sont inclus. Chaque boîte contient deux lots de cinq fragments (obtenus selon le protocole de combustion décrit au chapitre II) d'un même taxon, séparés par une bande de grillage fin (<1mm). Douze taxons (*Acer pseudoplatanus*, *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Juniperus oxycedrus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Populus alba*, *Quercus pedunculata* et *Quercus pubescens*), dont deux intégrés sous leur forme saine et altérée (*Pinus sylvestris* et *Betula pubescens*), sont testés dans le cadre de cette expérience. Une dernière couche de

sable rouge, puis de sédiment sont déposées afin d'atteindre la surface des boîtes. Les couches de sables rouge avaient été incluses afin de pouvoir observer les éventuelles déformations du sédiment depuis l'extérieur des boîtes, mais rapidement le plastique a été recouvert d'argile à l'intérieur des boîtes et les mouvements induits par les cycles, que nous espérons pouvoir suivre grâce aux dépôts de sable n'ont plus été visibles au-delà du troisième cycle d'humectation du sédiment.

II.2.2. Cycles retrait-gonflement et forces en jeu

Le séchage du dispositif expérimental est long. À température ambiante, plusieurs semaines s'écoulent avant que des fentes apparaissent à la surface de la matrice sédimentaire. Nous avons donc accéléré le processus en pratiquant un séchage en étuve à 35°C, température qui n'induit pas de transformation du matériau. Même en étuve, le séchage n'est complet (craquellement de la matrice sédimentaire sur toute sa hauteur) qu'après 8 à 10 jours. Lorsque l'état sec avec apparition de fentes est atteint, les boîtes sont sorties de l'étuve et la matrice est ré-imbibée. Le dispositif est laissé à l'air libre pendant deux jours de manière à ce que l'eau pénètre à l'intérieur des charbons. En deux ans et demi, ce sont 90 cycles retrait-gonflement qui ont ainsi pu être réalisés.

Dans les sols, les pressions de gonflement sont dépendantes de l'état de contrainte. Si l'augmentation de volume est empêchée, les pressions de gonflement seront alors très fortes. Dans notre essai, il n'a pas été possible d'appliquer une charge constante sur chaque boîte. Le gonflement s'effectue donc librement, sans application de charge et le niveau de contrainte (pression de gonflement) est donc faible. Les pressions mises en jeu sont essentiellement celles liées au phénomène de retrait et correspondent à des contraintes de traction et/ou de cisaillement. Il faut ajouter à cela l'effet d'usure et le processus d'imbibition dessiccation des fragments de charbon de bois eux-mêmes.

II.2.3. Traitement du matériel expérimental

À l'issue de l'expérimentation, les boîtes sont découpées à l'aide d'une petite scie circulaire afin d'extraire les deux lots de charbons qu'elles contiennent sans exercer de

nouvelles pressions. La bande de grillage incluse dans les boîtes au départ de l'expérimentation permet de traiter les lots séparément. Chaque lot est tamisé sur une colonne de tamis]0.5-1mm],]1-2mm],]2-4mm], >4mm. Les charbons de bois sont séchés à température ambiante puis les fragments sont décomptés manuellement ou par analyse d'image (macro Image J, cf. chapitre II, § II.1.) et des pesées par classe de taille sont effectuées.

II.3. Présentation des résultats

II.3.1. Fragmentation des charbons de bois dans les deux lots d'échantillons : observations générales

Taxons	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total fragt.	total >1mm	total frgts. déposés	Facteur d'augment° du nb. de frgts.
<i>Acer</i>	12	10	0	8	30	18	5	3.6
<i>Betula</i>	71	19	1	8	99	28	5	5.6
<i>Carpinus</i>	62	10	0	7	79	17	5	3.4
<i>Corylus</i>	18	10	0	7	35	17	5	3.4
<i>Fagus</i>	23	8	3	7	41	18	5	3.6
<i>Fraxinus</i>	18	9	1	8	36	18	5	3.6
<i>Juniperus</i>	17	4	0	7	28	11	5	2.2
<i>Pinus pinast.</i>	28	8	2	11	49	21	5	4.2
<i>Pinus sylv.</i>	198	63	5	8	274	76	5	15.2
<i>Populus</i>	113	32	7	12	164	51	5	10.2
<i>Quercus ped.</i>	28	15	1	5	49	21	5	4.2
<i>Quercus pub.</i>	16	10	0	6	32	16	5	3.2
<i>Betula alt.</i>	84	39	2	12	137	53	5	10.6
<i>Pinus sylv. alt.</i>	42	25	1	10	78	36	5	7.2

Tableau 24 : Nombre de fragments produits à l'issue des cycles de retrait-gonflement du sédiment dans le premier lot d'échantillons

Taxons	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total frags.	total >1mm	total frags. déposés	Facteur d'augment° du nb. de frags.
<i>Acer</i>	14	11	4	13	42	28	5	5.6
<i>Betula</i>	80	31	6	11	128	48	5	9.6
<i>Carpinus</i>	89	30	1	7	127	38	5	7.6
<i>Corylus</i>	43	16	1	5	65	22	5	4.4
<i>Fagus</i>	24	5	0	7	36	12	5	2.4
<i>Fraxinus</i>	4	4	0	6	14	10	5	2
<i>Juniperus</i>	77	12	0	6	95	18	5	3.6
<i>Pinus pinast.</i>	90	51	4	7	152	62	5	12.4
<i>Pinus sylv.</i>	95	39	3	11	148	53	5	10.6
<i>Populus</i>	23	11	1	8	43	20	5	4
<i>Quercus ped.</i>	43	17	2	6	68	25	5	5
<i>Quercus pub.</i>	52	13	4	6	75	23	5	4.6
<i>Betula alt.</i>	140	62	8	7	217	77	5	15.4
<i>Pinus sylv. alt.</i>	136	36	3	7	182	46	5	9.2

Tableau 25 : Nombre de fragments produits à l'issue des cycles de retrait-gonflement du sédiment dans le second lot d'échantillons

Si l'on prend en considération les quatre classes de taille (]0.5-1mm],]1-2mm],]2-4mm], >4mm) (tableaux 24 et 25), le nombre total de fragments oscille entre 28 pour *Juniperus* et 274 pour *Pinus sylvestris* dans le premier lot et entre 14 pour *Fraxinus* et 217 pour *Betula alt.* dans le second lot. Le nombre de fragments >1mm (classes]1-2mm],]2-4mm], >4mm) varie lui entre 11 et 76 dans le lot 1 et entre 10 et 77 dans le lot 2 pour les mêmes taxons, ce qui correspond à un facteur d'augmentation du nombre de fragment de 2.2 à 15.2 dans le premier lot et de 2 à 15.4 dans le second. La fragmentation est donc globalement moins importante qu'à l'issue des expérimentations précédentes (facteur d'augmentation maximal de 190 dans l'expérience de gel-dégel chapitre IV, §. II.2.1. et de 184 dans la station météorologique de Levens, chapitre V, §. I.2.1.). Le nombre de fragments >4mm ne dépasse pas 13 (soit un peu plus du double du nombre de fragments initialement déposés – 5 -), et la classe]2-4mm] est extrêmement peu fournie. Certains taxons présentent un nombre de fragments relativement important dans la classe]1-2mm], alors qu'il est presque nul pour d'autres (*Fraxinus*, lot 2). **Les 90 cycles d'imbibition-dessiccation du sédiment ne produisent donc quasiment pas d'effet sur certains taxons alors qu'ils agissent plus fortement sur d'autres ; la réaction des essences est à nouveau inégale.**

II.3.2. Homogénéité de la fragmentation entre les deux lots expérimentaux

Le nombre de fragments supérieurs à 1mm (fig. 91) des deux lots d'échantillons est globalement proche et la variance des séries est statistiquement identique (tests de Levene). Le test de Mann-Whitney indique qu'il n'y a pas de différence significative de position des échantillons (annexe IV.2.1.). Hormis quelques exceptions (*Pinus pinaster*, *Populus*), les taxons qui sont faiblement ou fortement fragmentés dans un des lots suivent la même tendance dans le second. La fragmentation semble donc à nouveau suivre une tendance globalement dépendante du taxon.

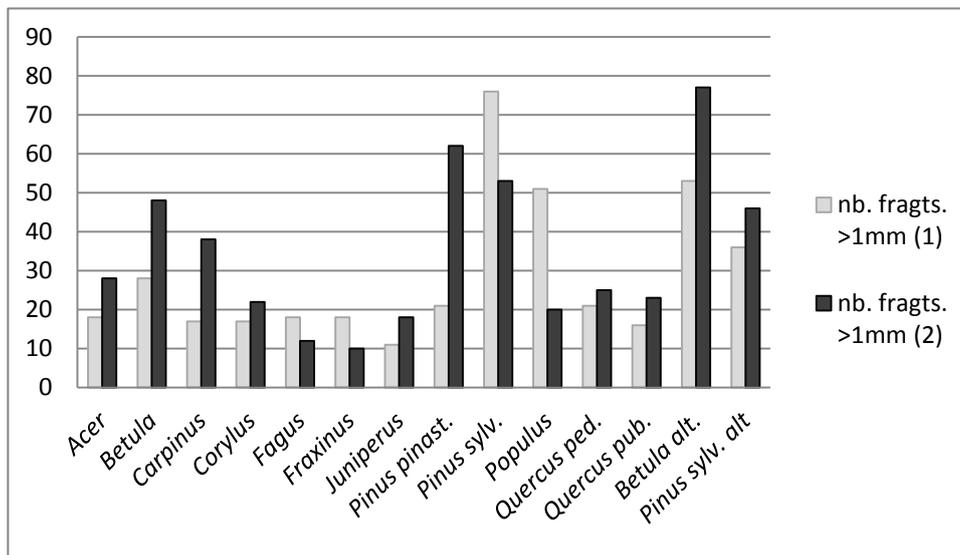


Figure 91 : Nombre total de fragments >1mm dans les deux cellules expérimentales

II.3.3. Analyse statistique de la fragmentation

- *Distribution des fragments par classe de taille*

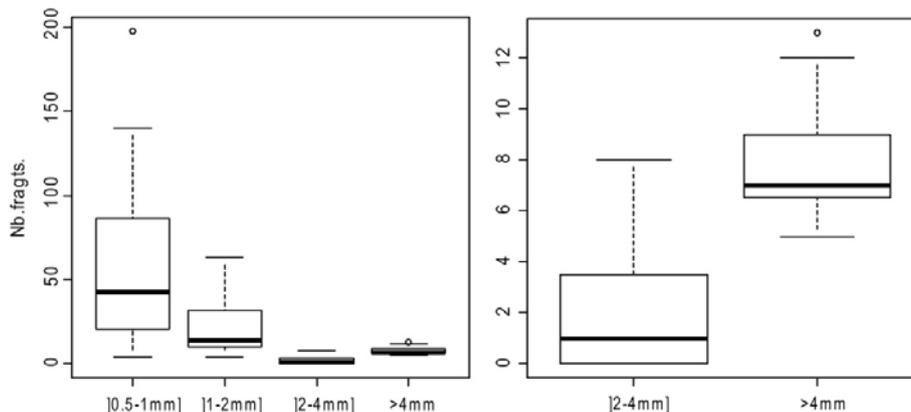


Figure 92 : Nombre de fragments par classe de taille a) toutes classes de taille de fragments (0.5 à 4mm), b) classes de taille supérieures (]2-4mm], >4mm)

Statistiques descriptives	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm
Minimum	4	4	0	5
Maximum	198	63	8	13
Moyenne	58.6	21.4	2.1	8
Médiane	43	14	1	7
Écart-type (n)	46.385	16.644	2.231	2.195
Coefficient de variation	0.792	0.777	1.041	0.276

Tableau 26 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille (tous taxons et lots confondus)

Le nombre de fragments est surtout important dans les classes de taille inférieures.

Le nombre moyen de fragments est de 58.6 dans la classe]0.5-1mm] et de 21.4 dans la classe]1-2mm]. En revanche, la classe]2-4mm] compte seulement 2.1 fragments en moyenne. Cette classe est moins représentée que la classe >4mm (fig. 92) qui compte en moyenne 8 fragments.

Tous taxons et lots de charbons confondus, le nombre de fragments oscille entre 4 et 198 dans la classe]0.5-1mm], entre 4 et 63 dans la classe]1-2mm], entre 0 et 8 dans la classe]2-4mm] et entre 5 et 13 dans la classe >4mm (tableau 26).

- *Nombre de fragments par classe de taille : différences taxonomiques*

La formation de petits fragments]0.5-1mm] concerne, dans au moins un des deux lots, *Pinus sylvestris* sain et altéré, *Betula* sain et altéré, *Carpinus*, *Populus*, *Pinus pinaster* et *Juniperus* (fig. 93). Les mêmes taxons, à l'exception de *Juniperus*, produisent un nombre important de fragments]1-2mm] dans l'un ou l'autre des lots (fig. 94). La formation de fragments moyens est extrêmement réduite ; les mêmes taxons que dans les classes de taille inférieures, auxquels s'ajoutent *Acer* et *Quercus pubescens* dans le lot 2, présentent néanmoins un nombre de fragments légèrement plus important que les autres essences (fig. 95). Enfin, *Acer*, *Pinus sylvestris* sain et altéré, *Betula* sain et altéré, *Populus* et *Pinus pinaster* comptent au moins 10 fragments dans un des deux lots dans la classe >4mm, soit le double du nombre de fragments déposés (fig. 96).

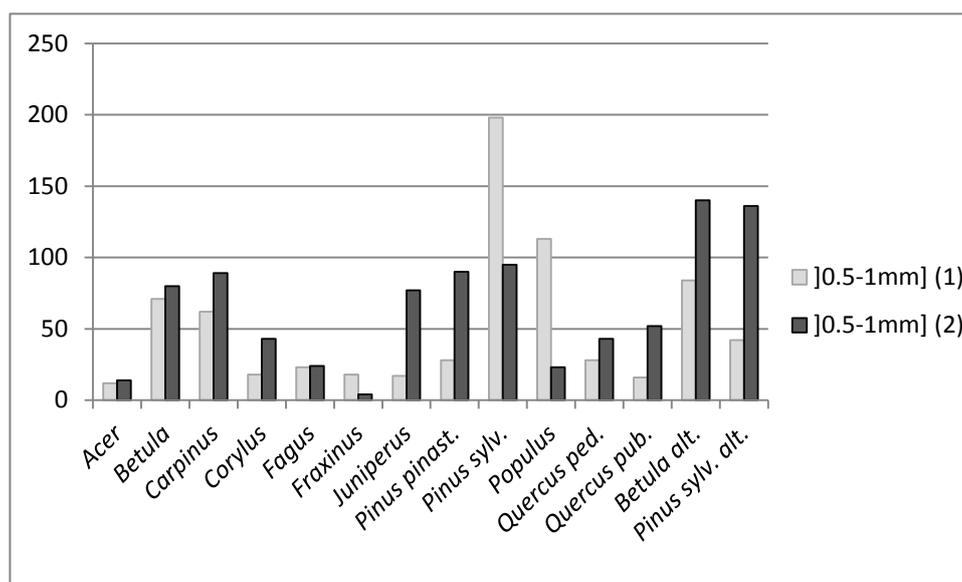


Figure 93 : Nombre de fragments dans la classe]0.5-1mm] dans les lots 1 et 2

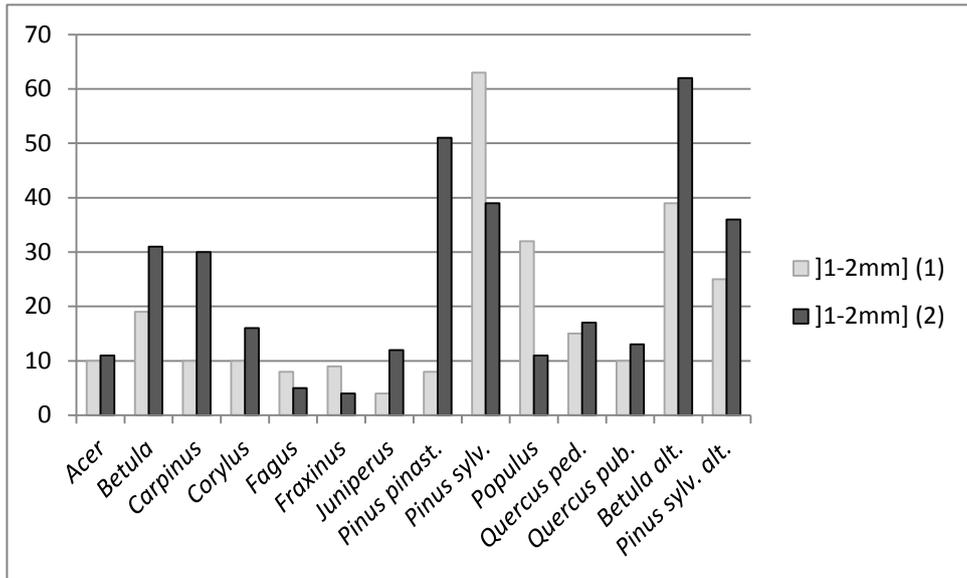


Figure 94 : Nombre de fragments dans la classe]1-2mm] dans les lots 1 et 2

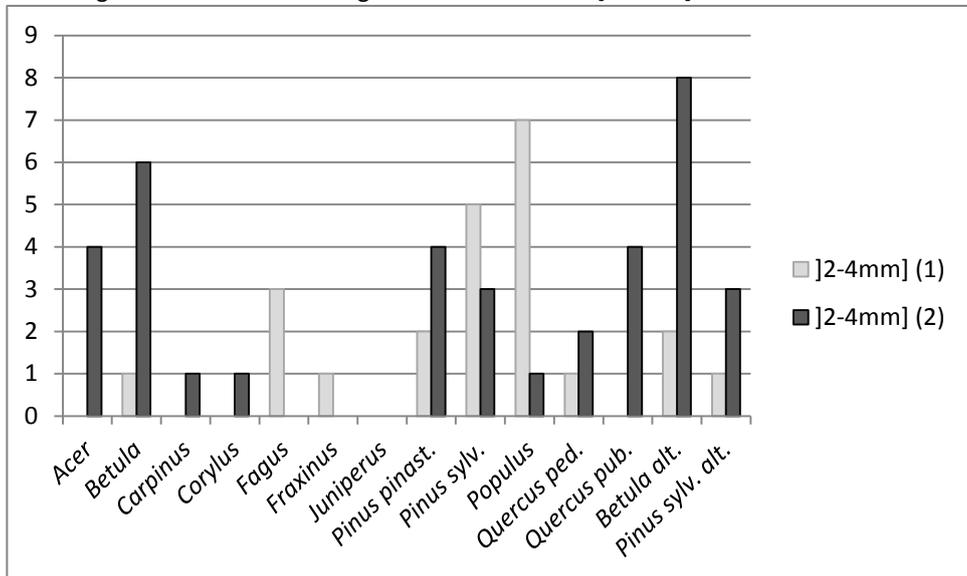


Figure 95 : Nombre de fragments dans la classe]2-4mm] dans les lots 1 et 2

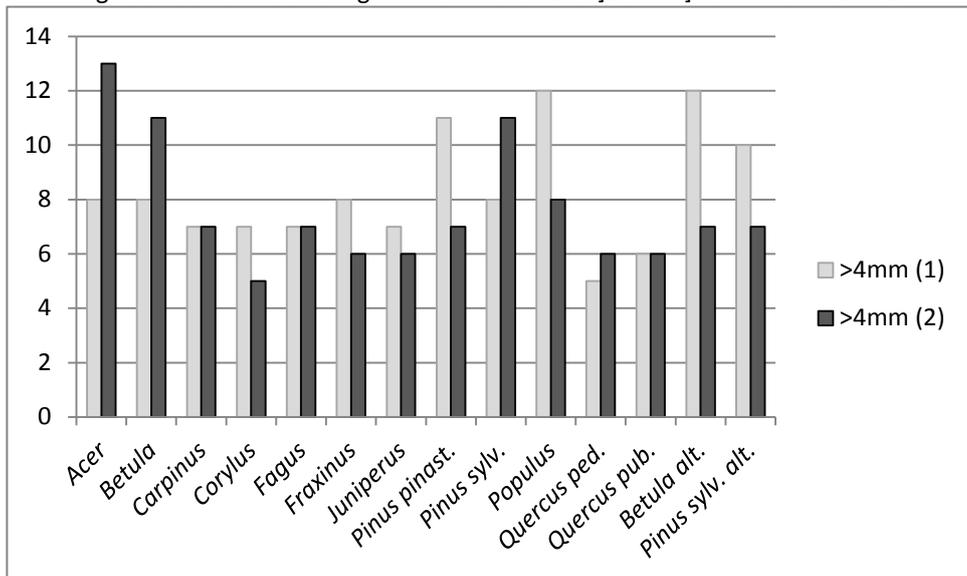


Figure 96 : Nombre de fragments dans la classe >4mm dans les lots 1 et 2

Le test de Kruskal-Walis (figure 97) incluant les huit valeurs disponibles par taxon (4 classes de taille x 2 lots par taxon, soit n=8) indique une p-value supérieure au seuil alpha 0.05. L'hypothèse d'identité des échantillons ne peut pas être rejetée sans un risque d'erreur de 51.34%. **La procédure de comparaison par paire associée à la correction de Bonferroni** (niveau de signification 0.0005) (figure 98) **ne met pas en évidence de différences significatives entre les taxons**. Sans la correction de Bonferroni, le risque d'erreur lié au rejet de l'hypothèse d'identité des échantillons est de 50.94%. Par contre la procédure de comparaison par paire permet de distinguer *Fraxinus* (très faible fragmentation) de *Pinus sylvestris* et *Betula* altéré dont la fragmentation est plus élevée (annexe IV.2.2.). À cette échelle d'analyse, les différences statistiques de fragmentation sont difficilement perceptibles. Pourtant, l'observation des histogrammes (fig. 93 à 96) met en évidence des distinctions entre certains taxons.

K	12.324
p-value (bilatérale)	0.513
alpha	0.05

Figure 97 : Test de Kruskal-Walis (toutes classes de taille et lots de charbons compris, n = 8 par taxon)

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes
<i>Fraxinus</i>	8	287.000	35.875	A
<i>Fagus</i>	8	357.000	44.625	A
<i>Juniperus</i>	8	359.500	44.938	A
<i>Corylus</i>	8	398.000	49.750	A
<i>Quercus pub.</i>	8	402.000	50.250	A
<i>Acer</i>	8	416.500	52.063	A
<i>Quercus ped.</i>	8	426.500	53.313	A
<i>Carpinus</i>	8	454.000	56.750	A
<i>Pinus pinast.</i>	8	490.000	61.250	A
<i>Pinus sylv. alt.</i>	8	513.500	64.188	A
<i>Populus</i>	8	520.000	65.000	A
<i>Betula</i>	8	538.000	67.250	A
<i>Pinus sylv.</i>	8	578.500	72.313	A
<i>Betula alt.</i>	8	587.500	73.438	A

Figure 98 : Différences significatives entre les taxons d'après la procédure de Dunn (comparaisons multiples par paires, test multilatéral ; niveau de signification corrigé de Bonferroni = 0.0005)

Les classifications ascendantes hiérarchiques (distances euclidiennes, méthode d'agrégation de Ward) qui suivent, permettent, en considérant les classes de taille séparément, de

visualiser les groupes de taxons dont la fragmentation est proche. Comme dans les analyses précédentes, les troncatures des dendrogrammes ont été effectuées manuellement de manière à mettre en évidence des groupes dont les distributions moyennes ne se chevauchent pas. Cela explique le placement des troncatures relativement haut dans l'arbre de classification. Une troncature plus basse fait parfois apparaître des groupes qui ne se différencient que dans l'un des lots par exemple ; les profils de deux groupes distincts sont alors inversés d'un lot à l'autre. Le degré de variabilité mis en évidence semble plus aléatoire et difficilement explicable. Nous avons préféré nous en tenir aux divisions majeures de nos données.

- *Classification des taxons en fonction du nombre de petits fragments produits ([0.5-1mm],]1-2mm])*

Deux groupes de taxons se distinguent en fonction du nombre de petits fragments qu'ils produisent. Le groupe 2 est composé de ***Populus*, *Pinus sylvestris*, *Pinus sylvestris* altéré, *Betula* altéré, *Pinus pinaster*, *Betula* et *Carpinus***. Ces taxons produisent plus de fragments que ceux du groupe 1 (fig. 101), comprenant ***Quercus pubescens*, *Corylus*, *Quercus pedunculata*, *Juniperus*, *Fraxinus*, *Acer* et *Fagus*** (fig. 99 et 100).

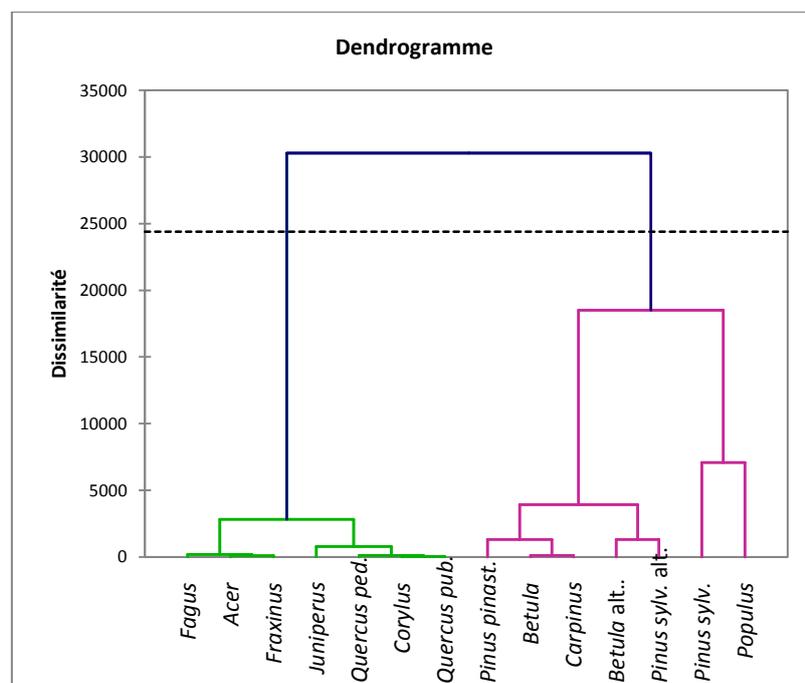


Figure 99 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de petits fragments produits (classes [0.5-1mm],]1-2mm])

Groupe	1	2
Objets	7	7
Somme des poids	7	7
Variance intra-classe	676.476	5382.333
Distance minimale au barycentre	8.010	22.437
Distance moyenne au barycentre	21.447	61.224
Distance maximale au barycentre	40.701	117.914
	<i>Acer</i>	<i>Betula</i>
	<i>Corylus</i>	<i>Carpinus</i>
	<i>Fagus</i>	<i>Pinus pinast.</i>
	<i>Fraxinus</i>	<i>Pinus sylv.</i>
	<i>Juniperus</i>	<i>Populus</i>
	<i>Quercus ped.</i>	<i>Betula alt.</i>
	<i>Quercus pub.</i>	<i>Pinus sylv. alt.</i>

Figure 100 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (petits fragments)

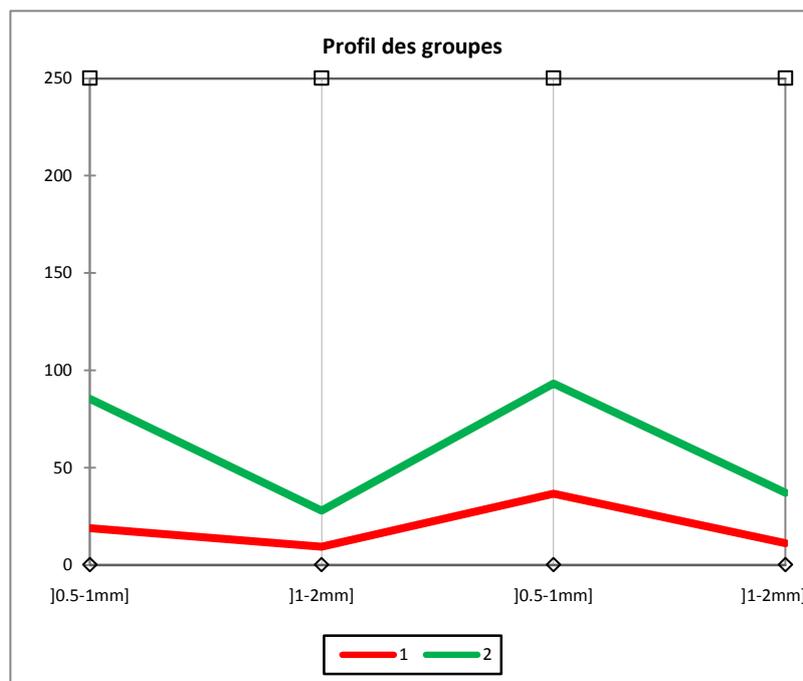


Figure 101 : Profil des groupes

- *Classification des taxons en fonction du nombre de gros fragments produits (]2-4mm], >4mm)*

Si l'on considère la production de moyens et de gros fragments (classes]2-4mm], >4mm), **deux groupes se distinguent à nouveau, relativement équivalents à ceux mis en évidence dans la classification précédente.** Le groupe 2, dont la fragmentation est plus

élevée (fig. 104), comprend à nouveau *Populus* et *Pinus sylvestris*, *Pinus sylvestris* altéré, *Pinus pinaster*, *Betula* altéré et *Acer* (qui remplace cette fois-ci *Carpinus*) et *Betula*. Le groupe 1 est composé des autres taxons (*Quercus pedunculata*, *Quercus pubescens*, *Fagus*, *Fraxinus*, *Corylus*, *Carpinus*, *Juniperus*) (fig. 102 et 103).

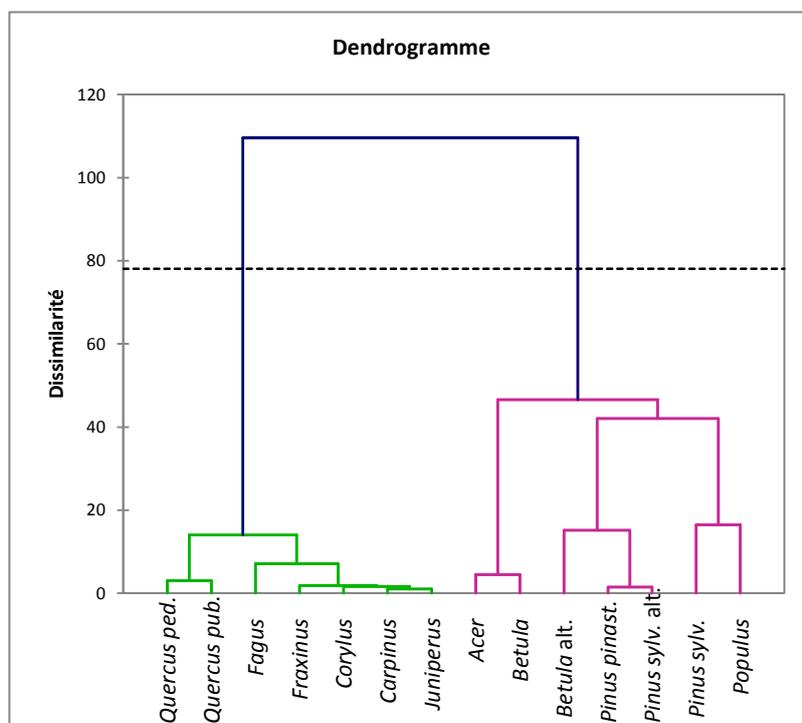


Figure 102 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de petits fragments produits (classes]2-4mm], >4mm)

Groupe	1	2
Objets	7	7
Somme des poids	7	7
Variance intra-classe	21.048	4.762
Distance minimale au barycentre	2.499	1.161
Distance moyenne au barycentre	4.088	1.910
Distance maximale au barycentre	5.949	3.034
	<i>Acer</i>	<i>Carpinus</i>
	<i>Betula</i>	<i>Corylus</i>
	<i>Pinus pinast.</i>	<i>Fagus</i>
	<i>Pinus sylv.</i>	<i>Fraxinus</i>
	<i>Populus</i>	<i>Juniperus</i>
	<i>Betula alt.</i>	<i>Quercus ped.</i>
	<i>Pinus sylv. alt.</i>	<i>Quercus pub.</i>

Figure 103 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (gros fragments)

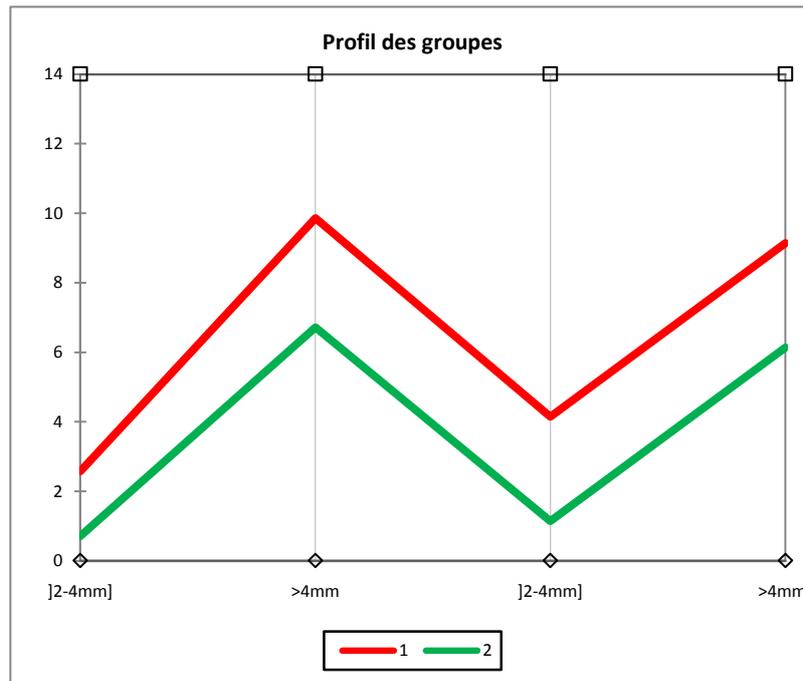


Figure 104 : Profil des groupes

II.3.4. Facteurs incidents sur la fragmentation

Le test de corrélation de Spearman met en évidence une corrélation négative entre l'intensité de la fragmentation et la masse volumique (fig. 105). **Plus la masse volumique est importante, moins le taxon a produit de fragments à l'issue de l'expérimentation et inversement** (représentation graphique de la relation présentée en annexe IV.2.3.). Le degré d'association entre les deux variables est de 26.4% (fig. 106). La corrélation est appuyée par un test de puissance dont le résultat est de 67%.

Variables	V	MV	P indice	P globale	Nb. Fragts.
V	1	-0.107	-0.134	-0.134	-0.018
MV	-0.107	1	0.511	-0.224	-0.514
P indice	-0.134	0.511	1	0.042	-0.364
P globale	-0.134	-0.224	0.042	1	-0.031
Nb. Fragts.	-0.018	-0.514	-0.364	-0.031	1

Figure 105 : Matrice des corrélations de Spearman (les valeurs en gras sont différentes de zéro à un niveau de signification alpha 0.05)

Variabes	V	MV	P indice	P globale	Nb. Frags.
V	1	0.012	0.018	0.018	0.000
MV	0.012	1	0.261	0.050	0.264
P indice	0.018	0.261	1	0.002	0.132
P globale	0.018	0.050	0.002	1	0.001
Nb. Frags.	0.000	0.264	0.132	0.001	1

Figure 106 : Coefficients de détermination de Spearman (les valeurs en gras sont significatives au seuil alpha 0.05)

II.4. Synthèse et discussion

À l'issue des 90 cycles retrait-gonflement du sédiment, nous avons constaté que :

- ✓ les charbons sont globalement moins fragmentés que lors des expériences précédentes.
- ✓ du fait de la fragmentation relativement faible des charbons dans cette expérimentation, les tests non paramétriques ne permettent pas de mettre en évidence de différences de comportement statistiquement significatives entre les taxons.
- ✓ toutefois, le nombre de fragments produits est variable et l'homogénéité de la fragmentation des essences entre les deux lots expérimentaux semble témoigner de **l'incidence du facteur « taxon » sur la variabilité de la fragmentation.**
- ✓ les classifications ascendantes hiérarchiques mettent en évidence **deux groupes de taxons** ; un sur lequel l'expérimentation a produit très **peu d'effets** –il s'agit de, ***Corylus, Fagus, Fraxinus, Juniperus, Quercus pedunculata et Quercus pubescens***–, et l'autre, sur lequel l'alternance des cycles de retrait-gonflement du sédiment génère une **fragmentation plus ou moins importante**. Il est composé de ***Betula, Pinus sylvestris, Pinus pinaster, Populus, Betula altéré et Pinus sylvestris altéré.***

Tous ces taxons ont un comportement constant quelle que soit la taille de fragments considérés. Inversement, *Acer* appartient au groupe peu ou pas fragmenté dans les classes de taille inférieures ([0.5-1mm],]1-2mm]) et au groupe dont la fragmentation est plus importante dans les classes de taille supérieures ([2-4mm], >4mm). *Carpinus* présente le comportement opposé ; il produit des petits fragments, mais peu de gros.

- ✓ la fragmentation des taxons est négativement corrélée avec leur masse volumique : Les taxons dont les charbons sont les moins denses se fragmentent plus que les autres.

Cet essai de retrait-gonflement met donc à nouveau en évidence la **réaction différentielle des taxons soumis à un processus donné**, bien qu'elle soit ici de moindre ampleur. Il est cependant remarquable que les taxons habituellement les plus fragmentés (notamment *Quercus pedunculata*, *Quercus pubescens*, *Corylus*, *Carpinus*, *Fagus*) soient les moins affectés dans cette expérience. Jusqu'à présent, lorsque nos essais mettaient en œuvre des phénomènes de pressions sur le matériel expérimental, il s'agissait exclusivement ou majoritairement de forces de compression. L'importance de la densité des charbons apparaissait alors comme un facteur favorisant l'éclatement du matériau, et donc la production de nombreuses particules de toutes les classes de tailles. Inversement ici, en l'absence de charge au moment du gonflement du sédiment, les forces de compression sont réduites. **Les forces de traction et de cisaillement et les phénomènes de fatigue du matériau sont les processus majeurs à l'œuvre dans cette expérience.** Soumis à ce type d'effort, la densité des charbons de bois joue à nouveau un rôle déterminant, mais inversé par rapport aux mécanismes de compression. **Les charbons les moins denses sont les plus sensibles, ceux qui se fragmentent le plus.**

De nouveaux essais mécaniques destinés à tester la résistance des charbons de bois aux forces de traction et de cisaillement, ainsi que nous l'avons fait en compression axiale au chapitre III, permettraient de préciser les propriétés mécaniques du matériau charbon. Car si ces résultats mettent à nouveau en évidence le comportement différentiel des espèces, ils montrent aussi que **les taxons peuvent réagir différemment selon le type de sollicitations auxquelles ils sont soumis.**

Notons par ailleurs que si la fragmentation des charbons de bois semble plus réduite dans cette expérience, le nombre de cycles l'est aussi. Or, si dans la réalité, la relation « nombre de fragments/nombre de cycles » n'est pas nécessairement linéaire, on peut néanmoins supposer qu'une exposition prolongée des charbons à un processus donné intensifie ses effets. À titre indicatif nous avons multiplié le nombre de fragments produits par taxon dans cette expérience de manière à atteindre 400 cycles comme cela était le cas lors des essais

d'alternances gel-dégel. L'intensité de la fragmentation est alors comparable aux résultats des expériences précédentes. Les alternances de **retrait et de gonflement** du sédiment pourraient donc constituer un **facteur de fragmentation des charbons de bois équivalent aux alternances gel-dégel**, mais affectant les espèces peu denses. En contexte naturel, le processus allie de manière plus équilibrée forces de compression au moment du gonflement du sédiment et forces de traction lors du retrait. Les mouvements sédimentaires affecteront alors *a priori* les charbons de faible comme de forte densité, conduisant à un relatif **nivellement de leur fragmentation**.

III. ESSAIS D'ALTERNANCES IMBIBITION-DESSICCATION DES FRAGMENTS DE CHARBONS DE BOIS ET EFFETS DU PH SUR LE MATÉRIEL ANTHRACOLOGIQUE

III.1. Introduction

Deux essais sont présentés conjointement dans cette partie. Un premier lot expérimental a été soumis à une série de cycles d'imbibition-dessiccation, cette fois sans présence de sédiment, de manière à documenter les seuls effets des alternances d'imbibition et de séchage des fragments de charbon de bois eux-mêmes. Parallèlement, un second lot expérimental a été placé dans trois solutions aqueuses de pH différents (acide, neutre, basique) ; ces échantillons n'ont pas subi de phase de séchage.

Les charbons ne sont donc pas soumis ici à des pressions externes, contrairement à la majeure partie des expérimentations présentées précédemment. Ils peuvent éventuellement faire l'objet de légères tensions internes lors de la phase de séchage (menée progressivement et à température ambiante, donc sans choc thermique) ainsi que d'un effet d'usure lié à la répétition des cycles.

Le second lot d'échantillon ne subit aucun de ces effets, seule l'incidence potentielle du pH du milieu est ici observée.

III.2. Protocoles expérimentaux

III.2.1. Composition des lots d'échantillons et dispositifs expérimentaux

Les mêmes taxons que précédemment sont testés dans le cadre de ces expériences ; il s'agit d'*Acer pseudoplatanus*, *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Juniperus oxycedrus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Populus tremula* et *Quercus pedunculata*. *Pinus sylvestris* et *Betula pubescens* sont à nouveau intégrés sous leur forme saine et altérée.

- *Imbibition-dessiccation*

Deux fragments de charbon de chaque taxon (obtenus selon le protocole de combustion décrit au chapitre II § 1.3.) sont pesés et mesurés, puis chacun des deux fragments est placé dans un « pot à prélèvement » rempli d'eau (n = 1 fragment x (11 taxons sains + 2 altérés) x 2 lots expérimentaux = 26). Un voile en tissu de maille très fine (<400µm) est fixé sur les récipients afin de pouvoir vidanger l'eau régulièrement sans que les plus fines particules de charbon ne s'échappent.

Les phases d'imbibition et de séchage du matériel expérimental sont relativement longues. Nous avons cherché au départ à déterminer la durée nécessaire pour que les fragments de charbon soient suffisamment imbibés d'eau pour couler au fond du récipient. La plupart des taxons coulent au bout de deux jours seulement. Il faut quatre jours pour que le pin sylvestre et le frêne soient immergés. En revanche, après plus de quinze jours d'imbibition, au moins un des deux fragments de *Quercus pedunculata*, *Juniperus*, *Populus* et *Pinus sylvestris* altéré flottaient encore. Des observations répétées ont confirmé la durée de suspension beaucoup plus longue de ces taxons.

De manière à réduire la durée des cycles et multiplier leur nombre, nous avons choisi de vidanger les tubes après quatre jours d'imbibition, temps nécessaire à l'immersion de la majorité des essences. Le séchage se fait à l'air libre à température ambiante ; il faut huit à dix jours pour que les traces d'humidité disparaissent à l'intérieur des tubes. Il faut donc douze jours minimum pour réaliser un cycle complet.

De janvier 2009 à octobre 2012, 87 cycles imbibition-dessiccation des charbons de bois ont été réalisés, soit un nombre quasiment équivalent aux 90 cycles des tests de retrait-gonflement du sédiment.

- *pH*

De l'eau distillée a été utilisée comme base de la solution neutre, le pH mesuré (pHmètre) est de 7.10. L'eau distillée est mélangée à du bicarbonate de sodium jusqu'à atteindre un pH de 8.12 pour constituer la solution basique, tandis que la solution acide est obtenue par mélange avec de l'acide acétique à 100% jusqu'à atteindre un pH de 4.10.

Deux fragments de charbon, pesés et mesurés, de chaque taxon sont placés séparément dans deux pots à prélèvement pour chaque solution ($n = 2$ fragments \times (11 taxons sains + 2 altérés) \times 3 solutions aqueuses = 78).

Une fois les charbons placés dans les solutions, nous avons constaté une remontée générale des pH, liée à la présence de cendres à l'intérieur des fragments ; les mesures réalisées pour les échantillons placés en solution acide oscillent entre 4.70 et 6, les solutions initialement neutres sont légèrement basiques (autour de 7.20) et l'alcalinité des dernières augmentent jusqu'à atteindre 8.96.

Les charbons ont été maintenus dans les solutions d'avril 2009 à janvier 2013, soit pendant presque quatre ans.

III.2.2. Traitement du matériel expérimental

- *Imbibition-dessiccation*

À l'issue des 87 cycles d'imbibition-dessiccation du matériel, les pots à prélèvement sont vidés sur une colonne de tamis [0.5-1mm], [1-2mm], [2-4mm], >4mm. Après séchage des fragments à température ambiante, le comptage des particules et les pesées sont réalisés pour chaque classe de taille.

- *pH*

Des mesures du pH des solutions sont réalisées avant que les charbons n'en soient extraits. Les échantillons n'ayant produit qu'une très fine poussière de charbon, ils ont été tamisés sur un seul tamis de maille 160 μ m. Le corps du fragment initialement placé dans les solutions est pesé à l'issue de l'expérience et fait l'objet d'une observation macro et microscopique.

III.3. Présentation des résultats des tests d'imbibition-dessiccation

III.3.1. Fragmentation des charbons de bois dans les deux lots d'échantillons : observations générales

Toutes classes de taille comprises, le nombre de fragments oscille selon les taxons entre 1 et 56 dans le premier lot et entre 1 et 51 dans le second. Si l'on ne considère que les fragments >1mm, leur nombre oscille alors entre 1 et 19 dans le premier lot et entre 1 et 6 dans le second (tableaux 27 et 28). On peut donc dire d'emblée que les 87 cycles d'imbibition-dessiccation des fragments de charbon de bois **n'occasionnent qu'une fragmentation extrêmement réduite, quel que soit le taxon considéré.**

Encore une fois, il n'est pas possible d'utiliser la masse des fragments avant et après l'expérimentation pour évaluer la perte différentielle de matière, liée à une éventuelle dissolution progressive des fines particules de charbon. En effet, tous les fragments, à l'exception de *Pinus sylvestris* altéré dans le second lot, ont gagné en masse au cours de l'expérience.

Taxons	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total	total >1mm	Nb. fragt. initial
<i>Acer</i>	0	2	0	1	3	3	1
<i>Betula</i>	5	1	0	1	7	2	1
<i>Carpinus</i>	5	0	0	1	6	1	1
<i>Corylus</i>	24	1	1	2	28	4	1
<i>Fagus</i>	0	0	0	1	1	1	1
<i>Fraxinus</i>	0	0	0	1	1	1	1
<i>Juniperus</i>	43	4	0	1	48	5	1
<i>Pinus pinast.</i>	18	2	0	1	21	3	1
<i>Pinus sylv.</i>	21	7	0	1	29	8	1
<i>Populus</i>	2	2	1	2	7	5	1
<i>Quercus ped.</i>	46	7	1	1	55	9	1
<i>Betula alt.</i>	25	3	0	1	29	4	1
<i>Pinus sylv. alt.</i>	37	14	0	5	56	19	1

Tableau 27 : Nombre de fragments par taxon et par classe de taille dans le premier lot d'échantillons

Taxons	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total	total >1mm	Nb. fragt. initial
<i>Acer</i>	3	1	0	1	5	2	1
<i>Betula</i>	0	0	0	1	1	1	1
<i>Carpinus</i>	5	0	0	1	6	1	1
<i>Corylus</i>	0	1	0	1	2	2	1
<i>Fagus</i>	8	0	0	2	10	2	1
<i>Fraxinus</i>	2	1	1	3	7	5	1
<i>Juniperus</i>	46	4	0	1	51	5	1
<i>Pinus pinast.</i>	0	0	0	1	1	1	1
<i>Pinus sylv.</i>	22	3	0	3	28	6	1
<i>Populus</i>	35	1	0	1	37	2	1
<i>Quercus ped.</i>	29	4	0	1	34	5	1
<i>Betula alt.</i>	11	2	2	1	16	5	1
<i>Pinus sylv. alt.</i>	24	1	0	1	26	2	1

Tableau 28 : Nombre de fragments par taxon et par classe de taille dans le deuxième lot d'échantillons

III.3.2. Homogénéité de la fragmentation entre les deux lots expérimentaux

Quel que soit le test utilisé (comparaison de variance – Levene –, différence de position des échantillons – Mann-Whitney –) et quelles que soient les valeurs prises en compte (nombre total de fragments, nombre de fragments >1mm, nombre de fragment par classe de taille ; valeurs de toutes les classe de taille mises bout à bout par lot), **l'hypothèse d'égalité des échantillons n'est pas rejetée au seuil alpha 0.05** (une partie des tests sont insérés en annexe IV.3.1.).

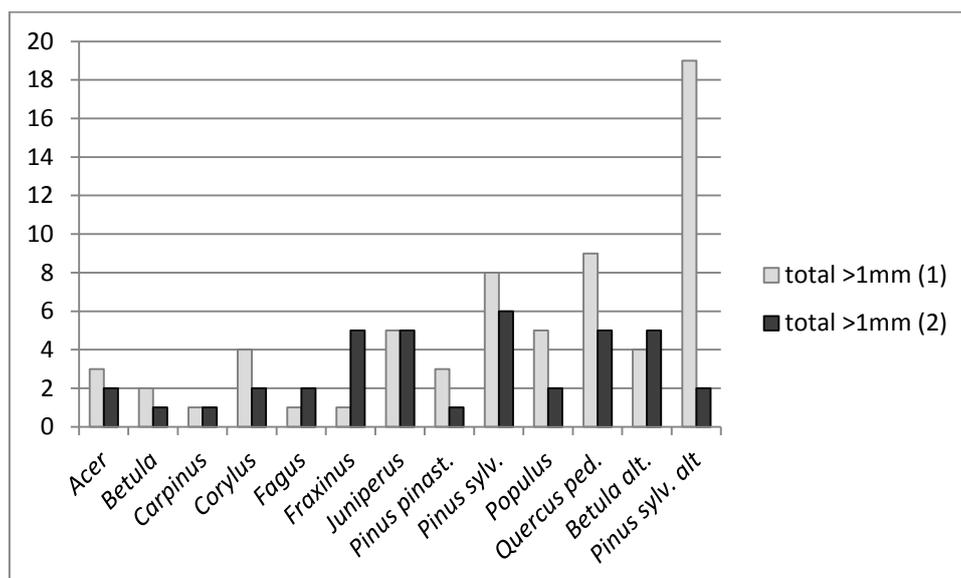


Figure 107 : Nombre de fragments >1mm produits à l'issue de l'expérimentation dans les deux lots d'échantillons

Les charbons étant très peu fragmentés dans l'un comme dans l'autre des lots, les séries sont statistiquement proches, et ne peuvent être différenciées, bien que des disparités apparaissent dans la fragmentation des deux lots d'échantillons (fig. 109, 110, 111 et 112).

Les taxons qui produisent des petites particules dans la classe]0.5-1mm] (« poussière de charbon ») sont relativement constants d'un lot à l'autre (tableau 27 et 28 et figure 109), mais une partie de la fragmentation qui n'apparaît que dans un des lots semble plus aléatoire.

III.3.3. Analyse statistique de la fragmentation

- *Distribution des fragments par classe de taille*

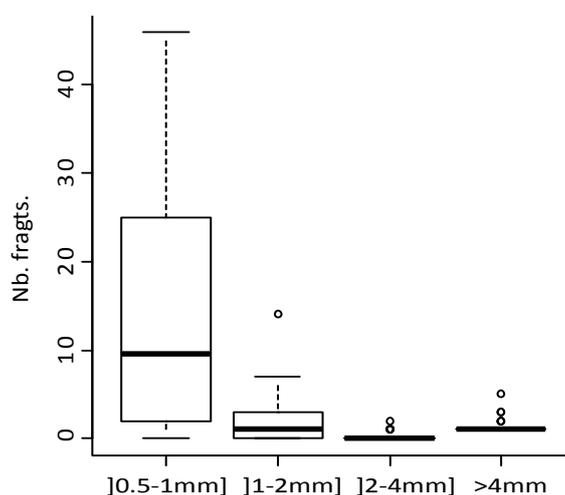


Figure 108 : Nombre de fragments par classe de taille (tous taxons et lots confondus)

Statistiques descriptives	]0.5-1mm]	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm]
Minimum	0	0	0	1
Maximum	46	14	2	5
Moyenne	15.8	2.4	0.2	1.4
Médiane	9.5	1	0	1
Écart-type (n)	15.593	3.037	0.504	0.927
Coefficient de variation	0.986	1.295	2.186	0.651

Tableau 29 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille (tous taxons et lots confondus)

Tous taxons et lots confondus, la classe]1-2mm] compte de 0 à 14 fragments, avec un nombre moyen de 2.4 fragments (la médiane est plus réduite encore -1-). La classe]2-4mm] n'est quasiment pas représentée avec au maximum 2 fragments et la plupart du

temps aucun (moyenne : 0.2 ; médiane : 0). La classe >4mm comprend le plus généralement l'unique fragment de charbon initial (nombre moyen de fragment : 1.4 ; médiane : 1), lequel est au maximum fragmenté en 5 morceaux. Seule la classe]0.5-1mm] est un peu mieux représentée et compte en moyenne 15.8 fragments, oscillant selon les taxons entre 0 et 46 fragments.

▪ *Nombre de fragments par classe de taille : différences taxonomiques*

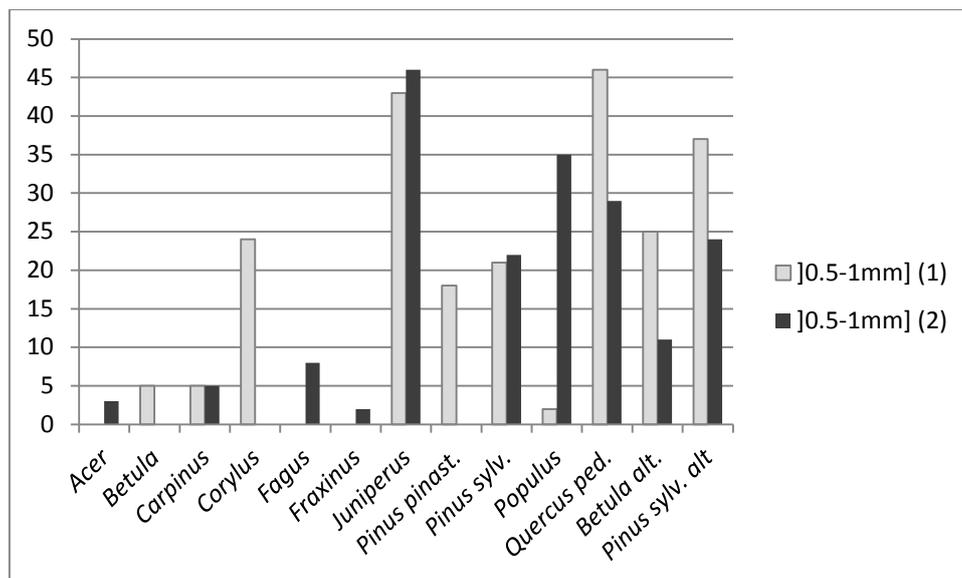


Figure 109 : Nombre de fragments produits par l'expérimentation par lots d'échantillons dans la classe de taille]0.5-1mm]

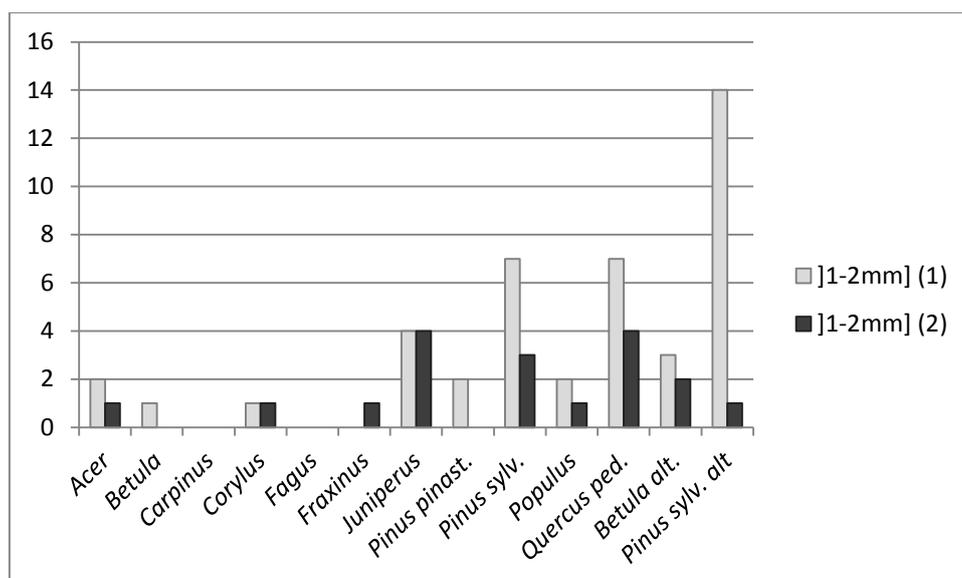


Figure 110 : Nombre de fragments produits par l'expérimentation par lots d'échantillons dans la classe de taille]1-2mm]

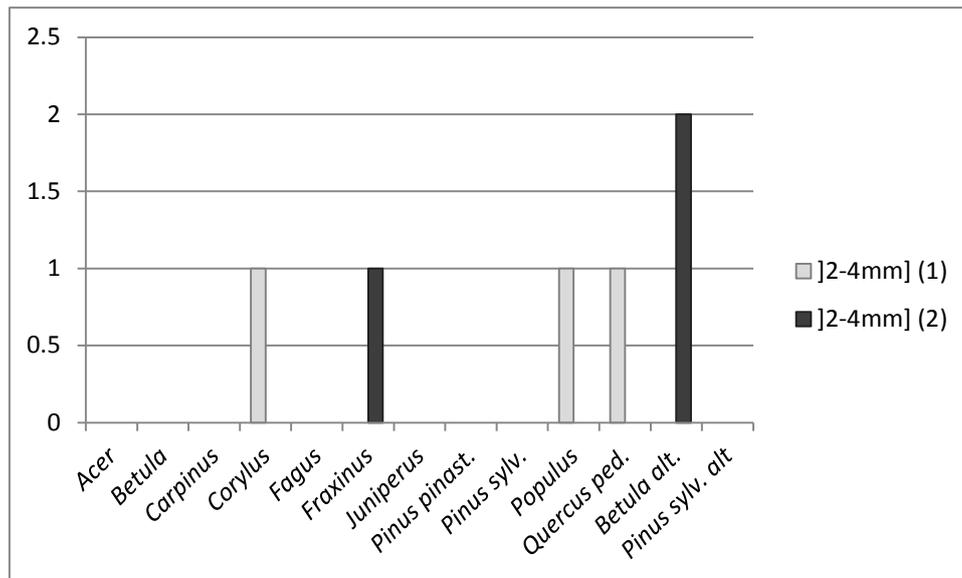


Figure 111 : Nombre de fragments produits par l'expérimentation par lots d'échantillons dans la classe de taille]2-4mm]

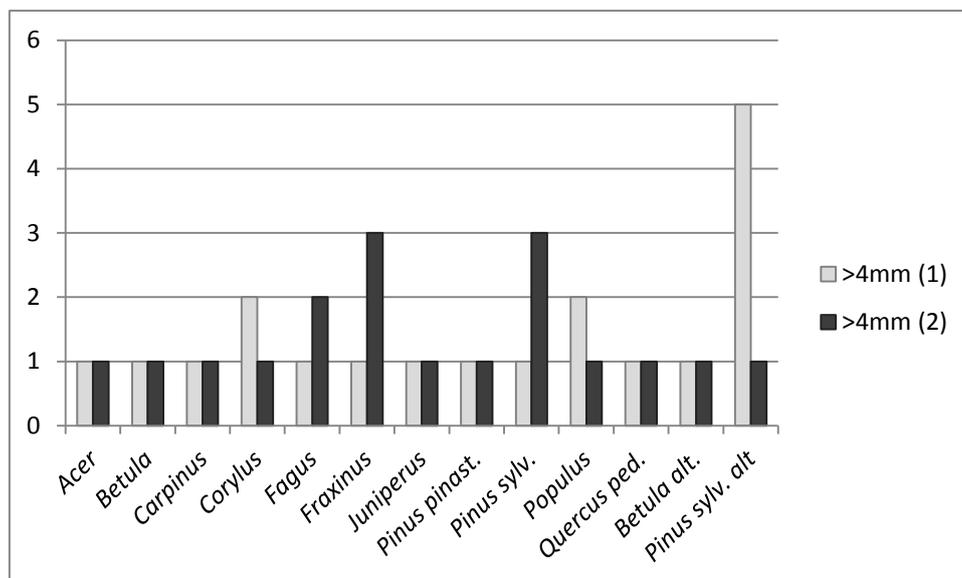


Figure 112 : Nombre de fragments produits par l'expérimentation par lots d'échantillons dans la classe de taille >4mm]

Les différences taxonomiques concernent essentiellement la classe]0.5-1mm].

Certains taxons produisent une fine poussière de charbon détachée du corps du fragment. C'est le cas de *Juniperus oxycedrus*, *Pinus sylvestris*, *Quercus pedunculata* et *Pinus sylvestris* altéré dans les deux lots d'échantillons, ainsi que de *Betula pubescens* altéré et *Corylus avellana* dans le premier lot et de *Populus* dans le second (tableau 27 et 28 et figure 109).

La classe]1-2mm] est globalement faiblement représentée, seul *Pinus sylvestris* altéré produit dans le premier lot une quantité plus importante de fragments que les autres taxons

(tableau 27 et figure 110). Ce même échantillon (*Pinus sylvestris*, lot 1) est également plus fragmenté dans la classe >4mm avec 5 fragments produits (tableau 27 et fig. 112).

Inversement, *Fagus sylvatica* et *Fraxinus excelsior* dans le premier lot, et *Betula pubescens* et *Pinus pinaster* dans le second lot, ne sont pas fragmentés du tout ; seul le fragment initialement mis en eau est retrouvé à l'issue de l'expérimentation (tableaux 27 et 28).

Si quelques différences de fragmentation entre les taxons semblent visibles, en particulier du point de vue de la production de petites particules (classe]0.5-1mm]), le test de Kruskal-Walis (figure 113) **ne met pas en évidence de différences statistiquement significatives**.

L'hypothèse H0 (les échantillons - les taxons - proviennent de la même population) n'est pas rejetée au seuil alpha 0.05. Le risque de rejeter l'hypothèse nulle alors qu'elle est vraie est de 21.64%.

K (Valeur observée)	15.477
K (Valeur critique)	21.026
DDL	12
p-value (bilatérale)	0.216
alpha	0.05

Figure 113 : Résultats du Test de Kruskal-Walis

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes
<i>Fagus</i>	8	298.000	37.250	A
<i>Betula</i>	8	305.500	38.188	A
<i>Pinus pinast.</i>	8	333.500	41.688	A
<i>Carpinus</i>	8	341.000	42.625	A
<i>Acer</i>	8	351.000	43.875	A
<i>Fraxinus</i>	8	351.000	43.875	A
<i>Corylus</i>	8	402.000	50.250	A
<i>Populus</i>	8	479.000	59.875	A
<i>Juniperus</i>	8	504.500	63.063	A
<i>Pinus sylv. alt.</i>	8	510.000	63.750	A
<i>Pinus sylv.</i>	8	518.500	64.813	A
<i>Betula alt.</i>	8	525.500	65.688	A
<i>Quercus ped.</i>	8	540.500	67.563	A

Figure 114 : Comparaisons multiples par paires (Procédure de Dunn, test bilatéral. Seuil de signification de Bonferroni = 0.0006)

De même, la procédure de comparaison multiple par paires (procédure de Dunn, fig. 114), ne met en évidence qu'un seul groupe homogène de taxons.

- *Classification des taxons en fonction du nombre de fragments produits par classe de taille dans les deux lots expérimentaux*

Nous avons réalisé une classification ascendante hiérarchique sur le total de fragments par classe de taille dans les deux lots expérimentaux.

La CAH permet d'individualiser 3 groupes distincts de taxons (figure 115 et 116). Les principales différences entre taxons concernent les deux premières classes de taille. Les classes]2-4mm] et >4mm présentent très peu de variabilité (figure 117). Le groupe 2 est composé de *Juniperus*, *Quercus pedunculata* et *Pinus sylvestris* altéré ; il présente le nombre moyen de fragments dans les petites classes de taille le plus élevé. Le groupe 3, composé de *Pinus sylvestris*, *Populus* et *Betula* altéré présente un taux de fragment un peu moins élevé que le précédent. Si l'on se reporte aux tableaux 27 et 28, la fragmentation de ces taxons est plus variable d'un lot à l'autre. Le dernier groupe (1) comprend tous les autres taxons, il correspond aux essences non fragmentées (*Acer*, *Betula*, *Carpinus*, *Fagus*, *Fraxinus*) ou dont la fragmentation est réduite et ne concerne qu'un seul des lots (*Corylus*, *Pinus pinaster*). Ces deux derniers taxons forment de ce fait un sous ensemble au sein du groupe 1 (fig. 115).

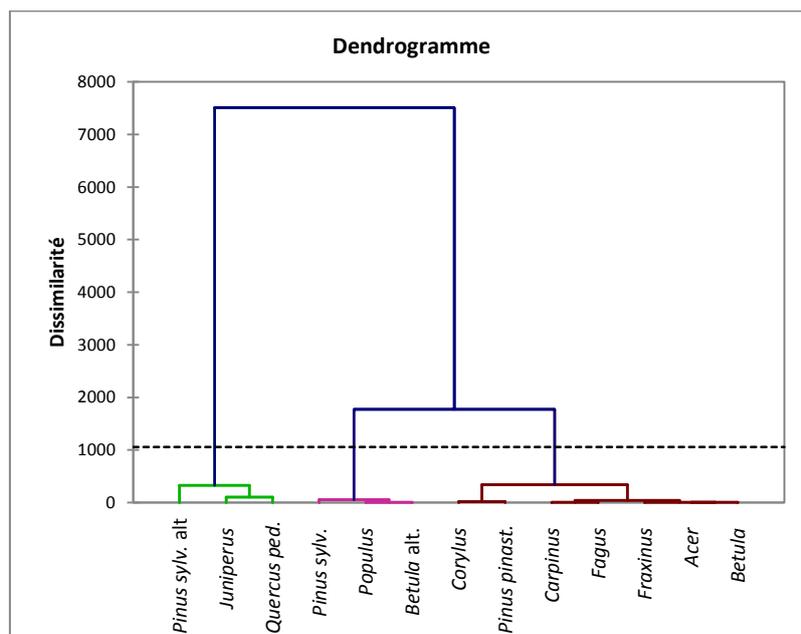


Figure 115 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction de leur nombre de fragments dans les quatre classes de taille et les deux lots expérimentaux

Groupes	1	2	3
Objets	7	3	3
Somme des poids	7	3	3
Variance intra-classe	69.095	214.000	29.333
Distance minimale au barycentre	1.436	1.528	3.180
Distance moyenne au barycentre	6.631	10.235	4.225
Distance maximale au barycentre	14.043	14.720	6.064
	<i>Acer</i>	<i>Juniperus</i>	<i>Pinus sylv.</i>
	<i>Betula</i>	<i>Quercus ped.</i>	<i>Populus</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Pinus sylv. alt.</i>	<i>Betula alt.</i>
	<i>Corylus</i>		
	<i>Fagus</i>		
	<i>Fraxinus</i>		
	<i>Pinus pinast.</i>		

Figure 116 : Statistique descriptives des groupes mis en évidence par la CAH

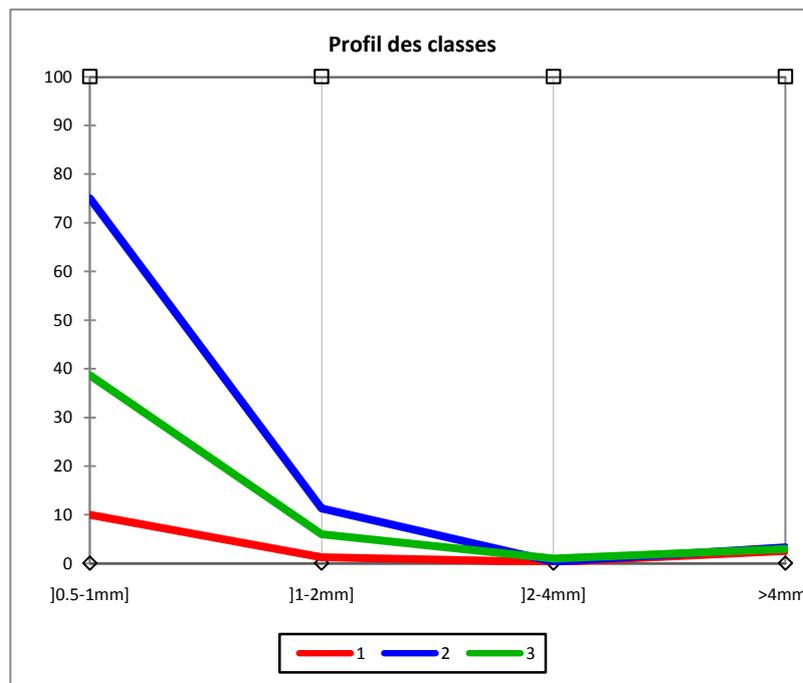


Figure 117 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments par classe de taille (]0.5-1mm],]1-2mm],]2-4mm], >4mm)

III.3.4. Facteurs incidents sur la fragmentation

D'après le test de Spearman, seule **la porosité globale présente une corrélation importante avec la fragmentation** (fig. 118). Le degré de corrélation est de 40% (fig. 119) et le test de puissance indique un résultat de 79% (le graphique de nuage de points est présenté en annexe IV.3.2.).

Variables	V	MV	P indice	P globale	Nb. Fragts.
V	1	0.049	0.003	0.267	0.035
MV	0.049	1	0.360	-0.422	-0.270
P indice	0.003	0.360	1	-0.104	0.180
P globale	0.267	-0.422	-0.104	1	0.632
Nb. fragts.	0.035	-0.270	0.180	0.632	1

Figure 118 : Matrice des corrélations de Spearman

Variables	V	MV	P indice	P globale	Nb. Fragts.
V	1	0.002	0.000	0.071	0.001
MV	0.002	1	0.130	0.178	0.073
P indice	0.000	0.130	1	0.011	0.032
P globale	0.071	0.178	0.011	1	0.400
Nb. fragts.	0.001	0.073	0.032	0.400	1

Figure 119 : Coefficients de détermination

III.4. Présentation des résultats des essais de variation du pH

Après plus de trois années de maintien des échantillons au sein des solutions acides/neutres/basiques, **seule une très fine poussière de charbon est produite pour quelques taxons**. Aucune fragmentation réelle (détachement de particules >1mm) des échantillons n'apparaît pour aucun des taxons. La plupart des fragments de charbon sont immergés ; seuls quelques taxons présentent encore un ou deux fragments en flottation, exclusivement dans les solutions acides ou basiques. En revanche, les six échantillons de *Juniperus* sont encore émergés à la surface des solutions. Ce dernier taxon est aussi celui qui produit le plus de « poussière de charbon ». Bien qu'ayant été tamisée sur une maille très fine et donc récupérée, cette poussière de charbon est impossible à quantifier du fait de la taille infime des particules. La pesée des fragments de charbon avant et après expérience montre une fois encore une légère hausse du poids des fragments à l'issue du test et la production de poussière de charbon ne peut donc pas être évaluée à partir de la perte de masse du fragment initial.

Les différences de pH mesurées avant le traitement des échantillons sont de plus faible amplitude qu'initialement. Les solutions initialement acides et neutres oscillent autour de la neutralité entre 6.3 et 7.7 (un seul échantillon conserve un pH plus acide de 5.5). Les solutions basiques se situent entre 7.3 et 8.5.

Il est clair que pour pouvoir observer plus finement les effets des variations de pH sur les charbons de bois, le protocole expérimental devrait être largement revu : un prétraitement des échantillons de manière à éliminer les particules cendreuse qui modifient le pH des solutions doit être pratiqué ; les échantillons doivent être immergés dans un volume de solution beaucoup plus important ; les solutions doivent éventuellement être initialement plus concentrées de manière à pallier les éventuels « équilibrages » des solutions ; le test de différents acides et bases doit être envisagé.

Quelques observations peuvent néanmoins être faites à partir de ce premier essai :

- le seul maintien en eau (quel que soit son pH) ne produit **aucune fragmentation, ni perte de masse** des échantillons
- **aucune variation de la réponse des taxons** n'est notée ; seul *Juniperus* produit une quantité de « poussière de charbon » légèrement plus importante que les autres taxons dont il n'est pas possible, en l'absence de mesures quantitatives, d'évaluer la « significativité ». Le taux de particules ne semble pas dépendant du pH des solutions les taxons altérés (*Pinus sylvestris* et *Betula*) ne paraissent pas plus affectés par le traitement que les taxons sains
- **aucune modification macroscopique** des échantillons n'est perceptible
- l'observation des fragments au microscope optique à réflexion ne montre **aucune altération des échantillons**, quel que soit le taxon et quel que soit le pH initial et final des solutions

III.5. Synthèse et discussion

À l'issue des 90 cycles d'imbibition et de dessiccation des charbons de bois réalisés, nous avons pu montrer que :

- ✓ la seule imbibition-dessiccation des charbons de bois eux-mêmes produit peu d'effets
- ✓ la production de fragments >1mm est extrêmement réduite

- ✓ l'effet majeur constaté concerne le détachement d'une fine poussière de charbon inférieure à 1mm
- ✓ des **différences de réaction très ténues existent entre les taxons** ; il s'agit essentiellement de la **quantité de « poussière de charbon »** qu'ils produisent. Trois essences y sont particulièrement sujettes : *Juniperus*, *Quercus pedunculata* et *Pinus sylvestris* altéré. Puis en ordre décroissant, *Pinus sylvestris*, *Populus*, *Betula* altéré, et dans une moindre mesure *Corylus* et *Pinus pinaster*. Le reste des taxons ne se fragmentent pas ou très peu.
- ✓ le test de Spearman montre une corrélation assez forte (40%) entre l'importance de la production de fines particules (qui constitue la majeure partie de la « fragmentation ») et la « porosité globale » des taxons. **Les espèces les plus poreuses sont celles que les cycles d'imbibition et de dessiccation des charbons affectent le plus.**

À l'issue de presque quatre années de maintien des charbons de bois en solution aqueuse, dont le pH varie légèrement, il apparaît que :

- ✓ les effets induits sont encore plus ténus ; **aucune fragmentation** des échantillons n'est notée
- ✓ **aucune modification macro ou microscopique** des échantillons n'est perceptible

Ainsi, **le seul dépôt en eau (quel que soit son pH) ne génère pas de « fragmentation »** à proprement parler, mais un **très léger « délitement »** de la matière. Certains taxons y semblent plus sensibles (en particulier *Juniperus*). Il n'est pas possible de tirer de conclusions concernant l'effet du pH sur les charbons de bois au vu du nivellement enregistré dans cette expérience (en particulier la neutralisation des solutions acides). Toutefois, les solutions initialement basiques présentent toujours un pH moyen de 8 à l'issue de l'essai. Si l'alcalinité est relativement faible, elle est toutefois proche de celle qui peut exister dans les sols et **ne produit pas d'effet notable** sur les charbons de bois. Ainsi, bien que des modifications structurales (à l'échelle atomique) de la matière soient notées par les chimistes lorsque les charbons de bois sont soumis à un environnement alcalin (cf. chapitre I,

§ II.3.), une altération du matériau à l'échelle macroscopique n'est pas perceptible dans notre essai. On restera bien évidemment très prudent quant à l'interprétation de ces résultats ; de nouveaux tests sur des échantillons plus nombreux et selon un protocole amélioré devront être menés pour pouvoir conclure sur les effets macroscopiques de la variation du pH du milieu sur les charbons de bois. En l'état, on peut simplement affirmer que 46 mois d'immersion dans une solution basique obtenue par mélange eau distillée/bicarbonate de sodium (pH 8) ne produit pas d'effet macroscopique sur les charbons de bois. Cela ne présage pas de la bénignité d'une exposition plus durable.

À l'issue des tests d'imbibition-dessiccation, les charbons de bois sont plus affectés que lorsque ceux-ci sont simplement immergés en solution aqueuse. L'alternance des phases d'imbibition et de séchage des fragments produit donc un **léger effet d'usure** du matériau, conduisant au **détachement progressif de particules de taille variables, mais majoritairement inférieures à 2mm**. Inversement, les effets constatés sont bien inférieurs à ceux observés à l'issue des cycles de retrait-gonflement du sédiment. Ceci met à nouveau en évidence le **rôle majeur joué par les mouvements sédimentaires** sur la fragmentation des charbons de bois.

L'action de l'eau seule n'est donc pas destructrice pour les charbons de bois. Elle contribue toutefois très probablement à **fragiliser** les charbons lors des phases d'imbibition. Le charbon imbibé d'eau est plus « mou » et friable. Les actions mécaniques couplées à l'absorption d'eau par immersion ou par capillarité sont sans doute, à l'inverse, très dommageables pour le matériau.

IV. LE PIÉTINEMENT DES CHARBONS DE BOIS

IV.1. Introduction

Nous avons vu au chapitre 1 comment, dans certains sites (Kébara, Hayonim, Pech de l'Azé IV notamment), le piétinement a été identifié comme facteur d'altération des structures de combustion (Bar-Yosef et Meignen, 2007 ; Goldberg et Bar-Yosef, 1998 ; Dibble *et al.*, 2009). Il est probable que le piétinement (animal et humain) participe également de la fragmentation des charbons de bois, ainsi que cela a été montré expérimentalement pour d'autres types de matériaux (notamment le matériel lithique et osseux : Courtin et Villa, 1982 ; Stiner, 1995 ; Lenoble et Bordes, 2001 ; Thiebaut *et al.*, 2010b). Jusqu'à présent, aucune donnée ne permet de l'affirmer, et l'impact négatif du piétinement sur les dépôts anthracologiques a valeur *d'a priori*.

Le piétinement exerce, sur la surface sur laquelle il s'applique, une pression qui dépend essentiellement du poids de la personne (ou de l'animal), de la dimension de la zone de contact entre le corps et le sol, mais aussi de la vitesse de déplacement de l'individu (durée d'application de la force), de la densité du sol et probablement de sa granulométrie. La récurrence du piétinement, induit une pression répétée qui peut produire un phénomène de « fatigue » du matériau contenu dans le sol. La force exercée est unidirectionnelle, du haut vers le bas. En revanche, le charbon est issu d'un matériau, le bois, fortement anisotrope, dont les propriétés mécaniques varient selon les trois plans anatomiques (transversal, longitudinal, radial). Les essais de compression menés par Lancelotti *et al.* (2010) ont montré que, comme le bois, la résistance mécanique du charbon est plus importante en section transversale (lorsque la force est appliquée dans la direction axiale) qu'en section radiale (et probablement aussi longitudinale). Ainsi, les dommages potentiels occasionnés par le piétinement sur le charbon de bois dépendront également de l'orientation du fragment dans le sol. De même, les études sur le piétinement menées dans le but de tester la réaction du matériel lithique et osseux, montrent que la profondeur d'enfouissement a une forte incidence sur la fragmentation du matériau (Courtin et Villa, 1982 ; Lenoble et Bordes, 2001). De nombreux paramètres peuvent donc faire varier les effets induits par le piétinement, et il

est dès lors difficile de les prendre tous en compte à l'heure de la mise en place de protocoles expérimentaux.

Les résultats d'une première expérimentation sont présentés dans les lignes qui suivent.

Une autre expérimentation, mise en place antérieurement, est présentée brièvement à titre de comparaison.

Deux principaux facteurs de variation seront ainsi évoqués, la profondeur d'enfouissement et la granulométrie du sédiment. De même, parce qu'il est possible que tous les taxons ne réagissent pas de la même manière aux pressions induites par le piétinement, des charbons de plusieurs essences sont testés dans le cadre de ces deux expériences. La variabilité interspécifique est ainsi évaluée.

IV.2. Expérience 1

IV.2.1. Protocole expérimental (planche 10, annexe IV.4.)

IV.2.1.1. Composition des échantillons et déroulement de l'expérimentation

Douze espèces de feuillus et de conifères fréquemment retrouvées en contexte archéologique ont été testées dans le cadre de cette expérience : *Acer pseudoplatanus*, *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Corylus avellana*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Juniperus oxycedrus*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Populus alba*, *Quercus pedunculata* et *Quercus pubescens*. Comme précédemment, deux taxons issus d'un bois dégradé avant sa combustion sont également intégrés à l'expérience : le bouleau (*Betula pubescens*) et le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*).

Deux lots d'échantillons sont constitués, chacun composé de 10 fragments de charbon par essence (protocole de combustion conforme au § I.3. du chapitre II) [n = 10 fragments x (12 taxons sains + 2 altérés) x 2 lots expérimentaux = 280].

L'expérience s'est déroulée le 10 avril 2010 devant les anciens locaux du CEPAM à Sophia-Antipolis (Alpes-Maritimes). Nous avons choisi une surface plane, recouverte de pelouse. 28

petites cavités quadrangulaires de 20cm de côté sur 7cm de profondeur sont creusées en retirant des mottes régulières de pelouse et de terre végétale.

Une bâche en plastique est apposée sur toute la surface expérimentale et une première couche de sable à bâtir (sable standard, diamètre 0.5mm) est versée dans les cavités au-dessus de cette bâche, puis tassée à la main jusqu'à atteindre 2cm en deçà de la surface du sol. Les charbons de bois sont disposés, puis recouverts d'une seconde couche de sable atteignant le haut des cavités ; les charbons affleurent à la surface du sable. Les deux lots de charbons de chaque essence sont placés côte à côte.

Durant toute l'après-midi, les doctorants du Cepam et nous-mêmes nous sommes relayés pour marcher, pieds-nus, sur le dispositif.

En fin de journée, la bâche a été découpée entre chaque cavité et le contenu de chacune d'entre elles est ainsi récupéré dans son intégralité.

IV.2.1.2. Traitement du matériel expérimental

Le sable mêlé aux fragments de charbon a ensuite fait l'objet d'une flottation manuelle classique, sur une colonne de trois tamis :]1-2mm],]2-4mm], >4mm¹¹. Tous les fragments de charbons de bois produits par le piétinement ont pu être extraits du sédiment. Après séchage des fragments à température ambiante, les charbons sont photographiés, et comptés par classe de taille (décompte par analyse d'image, cf. chapitre II, § II.1.).

¹¹ Traitée antérieurement par rapport aux expérimentations présentées ci-vant, nous n'avions pas encore jugé utile d'évaluer la production de « poussière de charbon » (classe]0.5-1mm]) et les particules inférieures à 1mm n'ont donc pas été comptabilisées ici.

IV.2.2. Présentation des résultats

IV.2.2.1. Fragmentation des charbons de bois dans les deux lots d'échantillons : observations générales

Taxon	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total >1mm	Nb. initial frags	Facteur d'augment° nb. frags.
<i>Acer</i>	132	28	34	194	10	19.4
<i>Betula</i>	50	18	39	107	10	10.7
<i>Carpinus</i>	71	9	27	107	10	10.7
<i>Corylus</i>	101	27	40	168	10	16.8
<i>Fagus</i>	69	21	40	130	10	13
<i>Fraxinus</i>	42	8	14	64	10	6.4
<i>Juniperus</i>	73	17	26	116	10	11.6
<i>Pinus pinaster</i>	184	47	34	265	10	26.5
<i>Pinus sylvestris</i>	198	21	31	250	10	25
<i>Populus</i>	119	32	41	192	10	19.2
<i>Quercus ped.</i>	608	103	87	798	10	79.8
<i>Quercus pub.</i>	987	207	85	1279	10	127.9
<i>Betula alt.</i>	157	27	41	225	10	22.5
<i>Pinus sylv. alt.</i>	131	21	27	179	10	17.9

Tableau 30 : Nombre de fragments produit à l'issue de l'expérimentation par taxon et par classe de taille dans le lot 1

Taxon	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total >1mm	Nb. initial frags	Facteur d'augment° nb. frags.
<i>Acer</i>	163	56	41	260	10	26
<i>Betula</i>	101	22	37	160	10	16
<i>Carpinus</i>	79	26	50	155	10	15.5
<i>Corylus</i>	143	37	42	222	10	22.2
<i>Fagus</i>	26	8	14	48	10	4.8
<i>Fraxinus</i>	124	22	23	169	10	16.9
<i>Juniperus</i>	78	30	39	147	10	14.7
<i>Pinus pinaster</i>	31	3	20	54	10	5.4
<i>Pinus sylvestris</i>	301	71	51	423	10	42.3
<i>Populus</i>	254	66	44	364	10	36.4
<i>Quercus ped.</i>	717	155	97	969	10	96.9
<i>Quercus pub.</i>	895	197	96	1188	10	118.8
<i>Betula alt.</i>	60	8	23	91	10	9.1
<i>Pinus sylv. alt.</i>	280	102	61	443	10	44.3

Tableau 31 : Nombre de fragments produit à l'issue de l'expérimentation par taxon et par classe de taille dans le lot 2

À l'issue de l'expérimentation, la fragmentation des charbons de bois est **relativement importante dans les deux lots d'échantillons**. Le nombre moyen de fragments produits (toute classe de taille comprise) est de 291 dans le lot 1 et de 335 dans le lot 2. La fragmentation est toutefois très variable d'un taxon à l'autre. Le nombre total de fragments oscille entre 64 pour *Fraxinus* et 1279 pour *Quercus pubescens* dans le lot 1 (facteur d'augmentation de 6.4 à 127.9 par rapport aux 10 fragments initiaux) et entre 44 pour *Fagus* et 1188 pour *Quercus pubescens* dans le lot 2 (facteur d'augmentation de 4.4 à 118.8). **L'écart de fragmentation entre les taxons les plus, et les moins fragmentés, est donc très important.** *Quercus pubescens* est l'espèce la plus fragmentée dans les deux lots d'échantillons. En revanche, l'espèce la moins fragmentée n'est pas identique d'un lot à l'autre.

Afin de déterminer si la fragmentation est influencée par le facteur taxon, il convient en premier lieu de vérifier si le comportement des essences est reproductible d'un lot à l'autre.

IV.2.2.2. Homogénéité de la fragmentation entre les deux lots expérimentaux

La figure 120 présente le nombre total de fragments par taxon dans les deux lots d'échantillons. Le comportement général des taxons semble relativement proche. Les taxons à forte fragmentation, ou inversement, ceux à faible fragmentation, sont les mêmes dans les deux lots. Le second histogramme (fig. 121) présente également le nombre total de fragments par taxon dans les deux lots, mais nous avons exclu les deux espèces de chêne (*Quercus pedunculata* et *Quercus pubescens*), qui, du fait de leur très forte fragmentation risquaient de masquer les disparités entre les répliques des autres essences. L'observation de cet histogramme montre effectivement que la fragmentation des taxons dans les deux lots est plus variable qu'il n'y paraît. C'est particulièrement le cas de *Pinus pinaster* et *Betula altéra*, qui présentent un nombre de fragments réduit dans le lot 2, tandis que leur fragmentation est relativement importante dans le lot 1. Les autres essences présentent une variabilité moins élevée. On note de **nettes différences quantitatives d'un lot à l'autre, mais globalement les tendances « faible », « moyenne » et « forte » sont les mêmes dans les deux lots**. D'ailleurs, les tests de variance et de position des échantillons (test de Levene et de Mann-Whitney ; annexe IV.4.1.) ne mettent **pas en évidence de différence**

statistiquement significative (au seuil alpha 0.05) **entre les deux lots**, quelles que soient les valeurs prises en compte (nombre total de fragments >1mm ; nombre de fragments de chaque classe de taille ; valeurs de toutes les classes de taille mises bout à bout par lot).

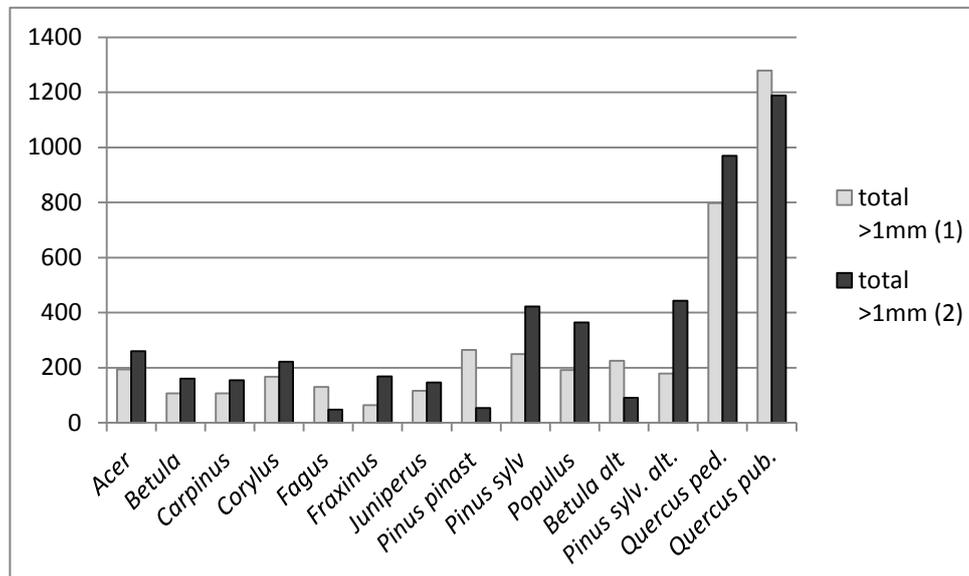


Figure 120 : Nombre total de fragments (classes de taille]1-2mm],]2-4mm] et >4mm) produits à l'issue de l'expérimentation par taxon dans les deux lots d'échantillons

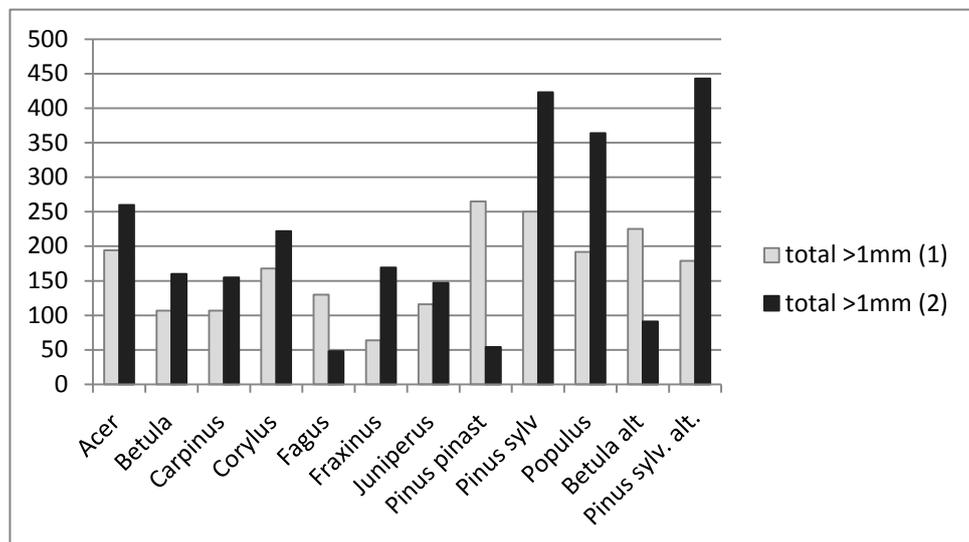


Figure 121 : Nombre total de fragments (classes de taille]1-2mm],]2-4mm] et >4mm) produits à l'issue de l'expérimentation par taxon dans les deux lots d'échantillons ; les deux espèces de chêne (*Quercus pubescens* et *Quercus pedunculata*) ont été exclues.

La variabilité perceptible d'un lot à l'autre est toutefois plus importante que lors des précédentes expérimentations. Cela est sans doute à mettre en lien avec les nombreux paramètres, évoqués en introduction, pouvant agir sur la fragmentation dans ce type

d'essai : orientation des fragments dans la matrice sédimentaire, différence d'application de la charge par le « piétinant », mais aussi éventuellement, la variation de la taille des fragments initialement inclus dans le sable (effet d'échelle).

Cependant, malgré les différences quantitatives mentionnées, les deux échantillons suivent visiblement un comportement globalement dépendant du facteur « taxon », justifiant une analyse plus détaillée de la fragmentation des essences.

IV.2.2.3. Analyse statistique de la fragmentation

- *Distribution des fragments par classe de taille*

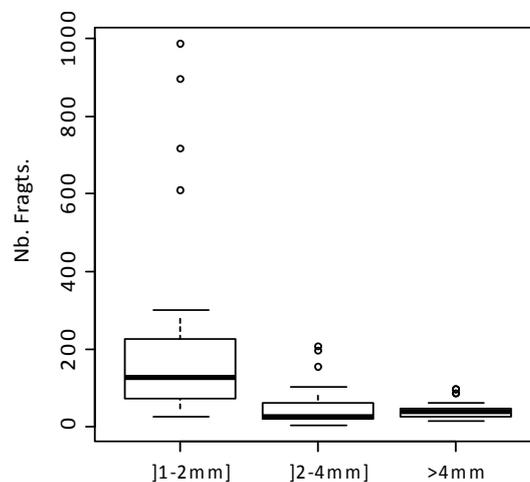


Figure 122 : Dispersion du nombre de fragments par classes de taille

Statistiques descriptives	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm
Minimum	26	3	14
Maximum	987	207	97
Moyenne	220.5	49.6	43
Médiane	127.5	27	39.5
Écart-type (n)	253.356	54.093	22.424
Coefficient de variation	1.149	1.090	0.521

Tableau 31 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille (tous taxons et lots confondus)

La figure 122 comme le tableau 31 montrent que le nombre de fragments varie selon la classe de taille. La classe]1-2mm] est la mieux représentée avec un nombre moyen de fragments de 220.5 pour 49.6 dans la classe]2-4mm] et 43 dans la classe >4mm. La fragmentation suit donc d'une manière générale une relation inversement proportionnelle à

la classe de taille, mais toutes les essences ne suivent pas ce schéma de répartition. En témoigne notamment l'infériorité de la médiane de la classe]2-4mm] par rapport à celle de la classe >4mm.

Par ailleurs, le nombre de fragments au sein de chaque classe est très variable d'un taxon à l'autre : le nombre de fragments dans la classe]1-2mm] varie entre 26 et 987, la classe]2-4mm] compte entre 3 et 207 fragments et la classe >4mm] entre 14 et 97. Le coefficient de variation le plus important concerne la plus petite classe de taille comme c'est souvent le cas ; ici, il est supérieur à 100%.

- *Nombre de fragments par classe de taille : différences taxonomiques*

Le nombre de petits fragments (classe]1-2mm]) est très variable entre les taxons.

Les deux espèces de chêne se détachent clairement du reste des essences, dont la plupart produisent moins de 200 fragments. Seuls *Pinus sylvestris* sain et altéré et *Populus* produisent plus de 200 fragments dans le second lot, tandis qu'une partie des essences (*Carpinus*, *Fagus*, *Juniperus*) n'atteignent pas la centaine de fragment dans l'un comme dans l'autre des lots (fig. 123).

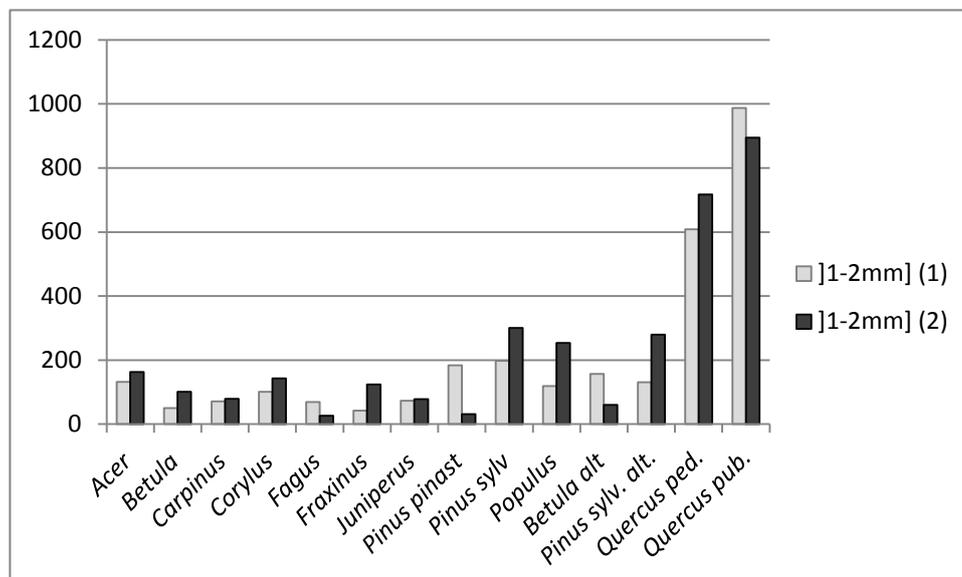


Figure 123 : Nombre de fragments de la classe]1-2mm] par taxon dans les deux lots

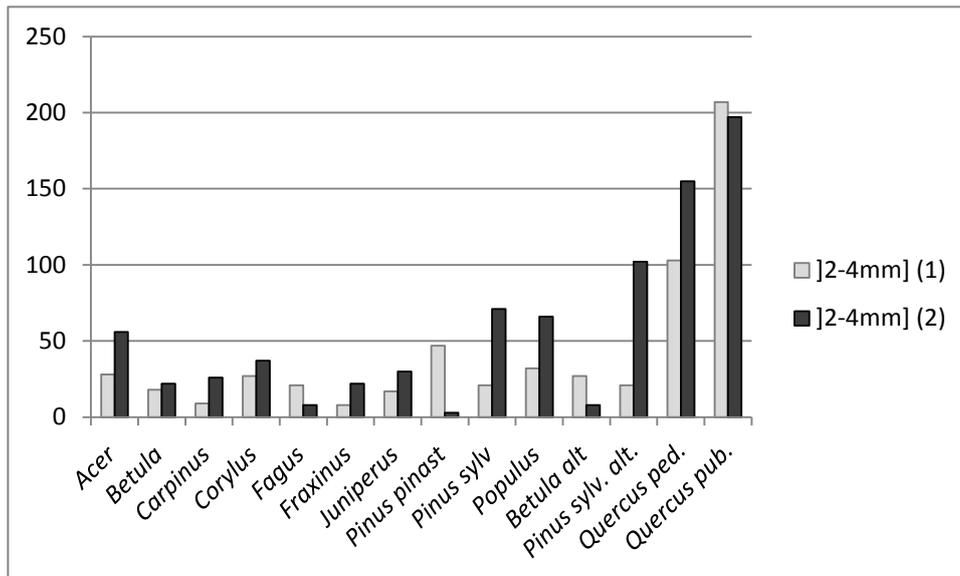


Figure 124 : Nombre de fragments de la classe]2-4mm] par taxon dans les deux lots

Les différences de fragmentation sont **toujours notables dans la classe]2-4mm]**. Les deux espèces de chêne se détachent à nouveau et les taxons présentant une fragmentation plus importante que la moyenne sont globalement les mêmes que dans la classe précédemment décrite (figure 124).

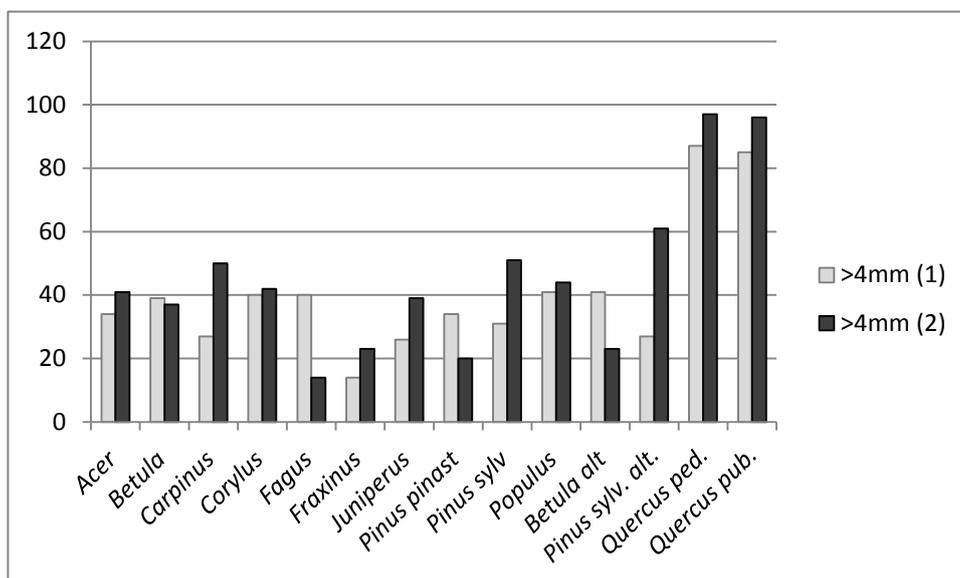


Figure 125 : Nombre de fragments de la classe >4mm par taxon dans les deux lots

Enfin, dans la classe supérieure à 4mm, bien que *Quercus pedunculata* et *Quercus pubescens* présentent toujours un nombre de fragments plus élevé que les autres taxons, la fragmentation semble **plus homogène entre les essences** (figure 125). En témoigne

d'ailleurs le coefficient de variation plus réduit de cette classe et la proximité de la médiane et de la moyenne (tableau 31). L'une comme l'autre tournent autour de 40 fragments, correspondant à 4 fois le nombre de fragments initialement déposés. Seuls *Fraxinus*, *Fagus*, *Pinus pinaster* et *Betula* altéré comptent autour de 20 fragments dans un des lots (fig. 125).

Le test de Kruskal-Wallis pratiqué à partir des six valeurs disponibles par taxon (3 classes de taille x 2 lots) indique que les échantillons appartiennent à des **populations statistiques différentes au seuil alpha 0.05** (figure 126). C'est-à-dire que le nombre de fragments dans les classes de taille est statistiquement différent entre les taxons.

K (Valeur observée)	30.995
K (Valeur critique)	22.362
DDL	13
p-value (bilatérale)	0.003
alpha	0.05

Figure 126 : Résultat du test de Kruskal-Wallis.

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes	
<i>Fagus</i>	6	129.000	21.500	A	
<i>Fraxinus</i>	6	149.000	24.833	A	B
<i>Pinus pinaster</i>	6	187.000	31.167	A	B
<i>Betula</i>	6	198.500	33.083	A	B
<i>Juniperus</i>	6	198.500	33.083	A	B
<i>Betula alt.</i>	6	202.000	33.667	A	B
<i>Carpinus</i>	6	202.500	33.750	A	B
<i>Corylus</i>	6	265.500	44.250	A	B
<i>Acer</i>	6	284.500	47.417	A	B
<i>Pinus sylv. alt.</i>	6	295.500	49.250	A	B
<i>Pinus sylvestris</i>	6	296.000	49.333	A	B
<i>Populus</i>	6	306.000	51.000	A	B
<i>Quercus ped.</i>	6	419.000	69.833	A	B
<i>Quercus pub.</i>	6	437.000	72.833		B

Figure 127 : Comparaisons multiples par paires (procédure de Dunn, test bilatéral. Seuil de signification de Bonferroni = 0.0005)

La procédure de comparaisons multiples par paires (procédure de Dunn ; figure 127) ne met en évidence qu'**une seule paire significativement différente** (selon le seuil de signification

corrigé de Bonferroni 0.0005), il s'agit de *Fagus*, qui est le taxon le moins fragmenté, et de *Quercus pubescens*, espèce de très loin la plus fragmentée.

Les classifications ascendantes hiérarchiques qui suivent permettent d'affiner la lisibilité de nos données.

- *Classification des taxons en fonction du nombre de fragments produits dans les trois classes de taille*

Une première classification réalisée à partir de toutes les valeurs disponibles (trois classes de taille x 2 lots) et incluant toutes les essences permet bien de distinguer les trois groupes qui semblaient se détacher par l'observation des histogrammes (fig. 123, 124, 125). L'inertie intra-groupe est extrêmement faible (8.94%) comme l'indique le profil très ramassé du dendrogramme général (fig. 128) ; inversement l'inertie inter-groupe est très forte (91.06%). La plus forte inertie inter-groupe concerne évidemment la distinction des deux espèces de chêne (*Quercus pubescens* et *Quercus pedunculata*, groupe 3, fig. 128 et 129) du reste des taxons. Un second groupe très homogène se détache, il est composé de *Pinus sylvestris* sain et altéré et de *Populus* (groupe 2, fig. 128, 129). Ce groupe présente une moyenne supérieure aux autres taxons, mais celle-ci est variable d'un lot à l'autre (fig. 130). Le reste des taxons composent le dernier groupe (groupe 1, fig. 128 et 129), dont la fragmentation est la plus réduite (fig. 130).

L'inertie très forte entre le groupe 3 et les deux autres groupes ne permet pas de visualiser d'autres différences entre les taxons, plus ténues, qui pourraient éventuellement apparaître. Nous avons également cherché à analyser plus finement le classement des taxons en fonction de la taille des fragments qu'ils produisent.

Une nouvelle classification ascendante hiérarchique est donc réalisée pour chaque classe de taille de fragment, mais en excluant les deux représentants du genre *Quercus*.

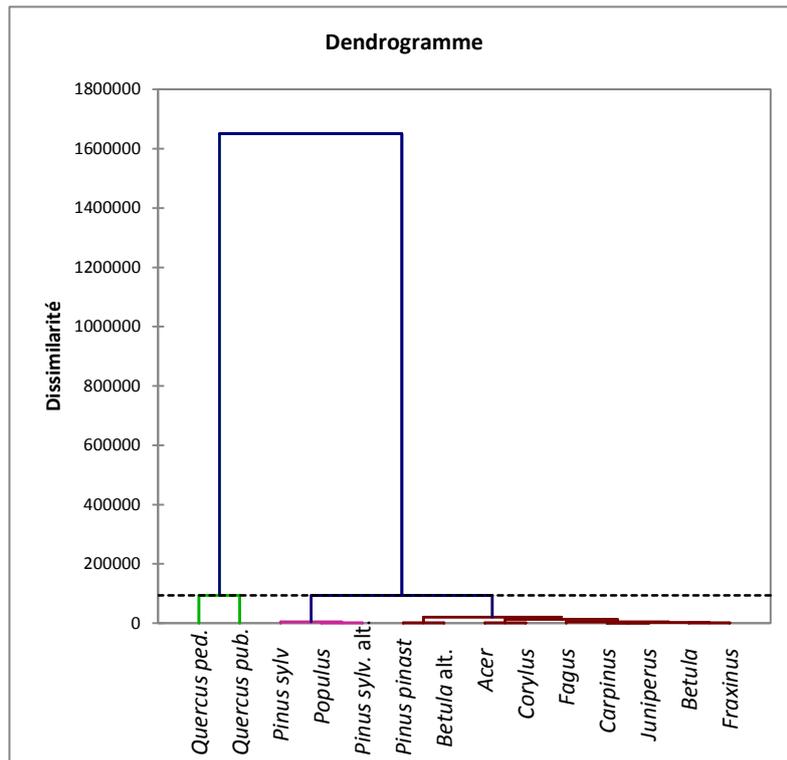


Figure 128 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons (toutes espèces, classe de taille de fragments et lots inclus)

Groupes	1	2	3
Objets	9	3	2
Somme des poids	9	3	2
Variance intra-groupe	5374.139	2912.333	93955.000
Distance minimale au barycentre	30.066	31.114	216.743
Distance moyenne au barycentre	65.002	43.011	216.743
Distance maximale au barycentre	109.740	54.551	216.743
	<i>Acer</i>	<i>Pinus sylv</i>	<i>Quercus ped.</i>
	<i>Betula</i>	<i>Populus</i>	<i>Quercus pub.</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Pinus sylv. alt.</i>	
	<i>Corylus</i>		
	<i>Fagus</i>		
	<i>Fraxinus</i>		
	<i>Juniperus</i>		
	<i>Pinus pinast</i>		
	<i>Betula alt.</i>		

Figure 129 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH

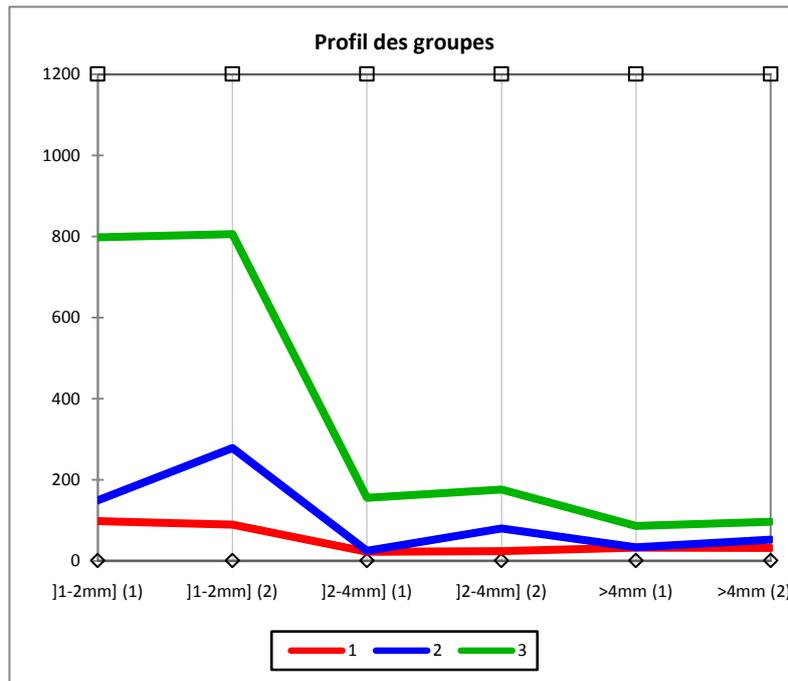


Figure 130 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments par classe de taille dans les lots expérimentaux (1) et (2)

Le dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments qu'ils produisent dans la plus petite classe de taille ([1-2mm]) fait apparaître une plus grande structuration des données (fig. 131). La troncature de l'arbre est positionnée de manière à créer des ensembles dont les profils (fig. 133) ne se recoupent pas. *Pinus sylvestris* sain et altéré ainsi que *Populus* constituent à nouveau un groupe bien distinct du reste des taxons (groupe 2). Cette première distinction est caractérisée par une très forte inertie. Le reste des taxons constitue un autre groupe (groupe 1, fig. 131 et 132), dont la fragmentation est inférieure (fig. 133). Toutefois, au sein de ce second ensemble, deux sous-ensembles présentent encore une inertie relativement importante (fig. 131) qui mérite d'être considérée. Le premier sous-ensemble est composé de *Pinus pinaster* et *Betula* altéré. L'observation des données brutes (tableaux 30 et 31 et figures 123, 124, 125) nous indique que ces taxons se caractérisent par une très forte hétérogénéité entre les deux lots. Ils présentent une fragmentation importante, se rapprochant des taxons du groupe 2 dans le premier lot, et une fragmentation réduite, se rapprochant des taxons du groupe 1 dans le second lot.

Acer et *Corylus* constituent un deuxième sous-ensemble, ils présentent une fragmentation légèrement supérieure aux autres taxons du groupe 1 dans les deux lots. Enfin, *Carpinus*, *Juniperus*, *Betula*, *Fraxinus* et *Fagus* composent le reste du groupe 1. Ils présentent peu de

différences ainsi qu'en témoigne la très faible inertie entre les branches à ce niveau de l'arbre. Notons que *Fagus* est isolé ; il présente le plus de différences significatives avec le reste des taxons, ainsi que l'avait mis en évidence la procédure de comparaisons multiples.

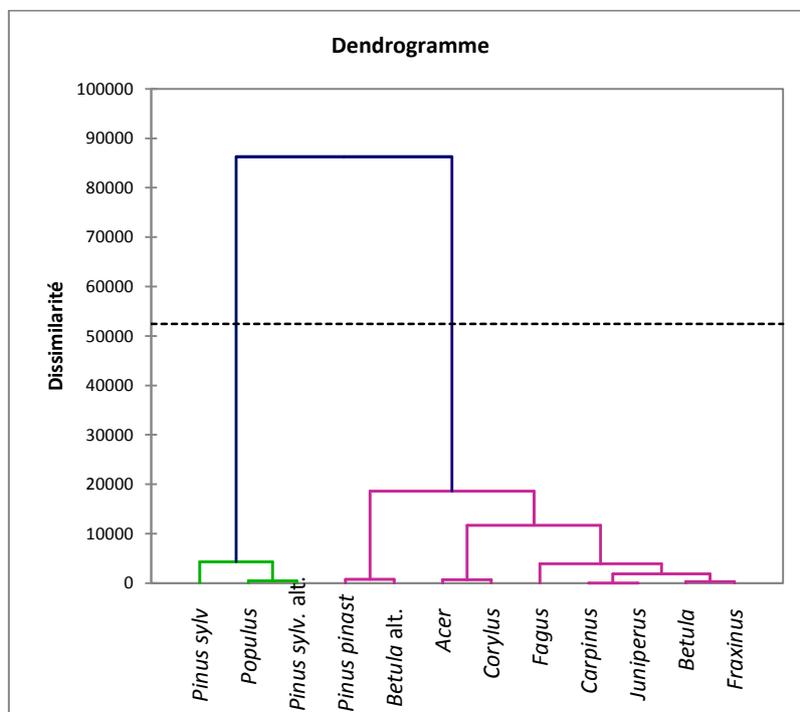


Figure 131 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons à partir du nombre de fragments de la classe]1-2mm] dans les deux lots expérimentaux (les deux espèces de chêne ont été sorties de l'analyse)

Groupe	1	2
Objets	9	3
Somme des poids	9	3
Variance intra-groupe	4728.778	2366.667
Distance minimale au barycentre	27.192	18.409
Distance moyenne au barycentre	60.594	36.994
Distance maximale au barycentre	104.255	53.686
	<i>Acer</i>	<i>Pinus sylv</i>
	<i>Betula</i>	<i>Populus</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Pinus sylv. alt.</i>
	<i>Corylus</i>	
	<i>Fagus</i>	
	<i>Fraxinus</i>	
	<i>Juniperus</i>	
	<i>Pinus pinast</i>	
	<i>Betula alt.</i>	

Figure 132 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH

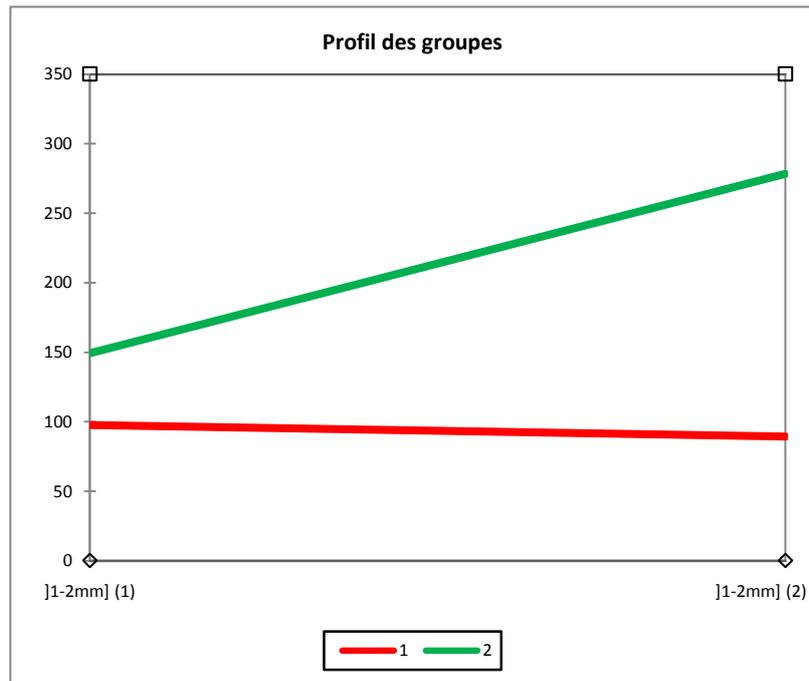


Figure 133 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments dans les deux lots expérimentaux pour la classe]1-2mm]

La seconde classification ascendante hiérarchique concerne le nombre de fragments produits par les taxons dans la classe]2-4mm]. La distinction majeure et la plus évidente laisse à nouveau apparaître deux ensembles principaux, légèrement différents de ceux de la classe]1-2mm].

Le groupe à fragmentation haute (groupe 1, fig. 136) comprend comme précédemment *Pinus sylvestris* sain et altéré et *Populus*, mais aussi *Acer* (fig. 134 et 135). Ce dernier taxon présente un nombre de fragments légèrement plus important que les espèces du groupe 2, mais aussi comme les trois autres taxons du groupe 1, un nombre nettement plus important de fragments dans le lot 2 par rapport au premier lot. Le groupe à fragmentation plus réduite (groupe 2, fig. 136) comprend tous les autres taxons (fig. 134 et 135), mais des agrégations secondaires sont à nouveau visibles (fig. 134). Dans le groupe 2, *Pinus pinaster* et *Betula* altéré, mais aussi *Fagus* sont regroupés ; ils se caractérisent par un faible nombre de fragments dans la classe]2-4mm] et par la supériorité de leur fragmentation dans le lot 1 par rapport au lot 2. De même, *Corylus* se distingue de *Carpinus*, *Fraxinus*, *Juniperus* et *Betula* par sa fragmentation légèrement plus importante.

Dans le groupe 1, *Pinus sylvestris* altéré se détache de *Pinus sylvestris* sain, *Acer* et *Populus* du fait d'une fragmentation plus importante.

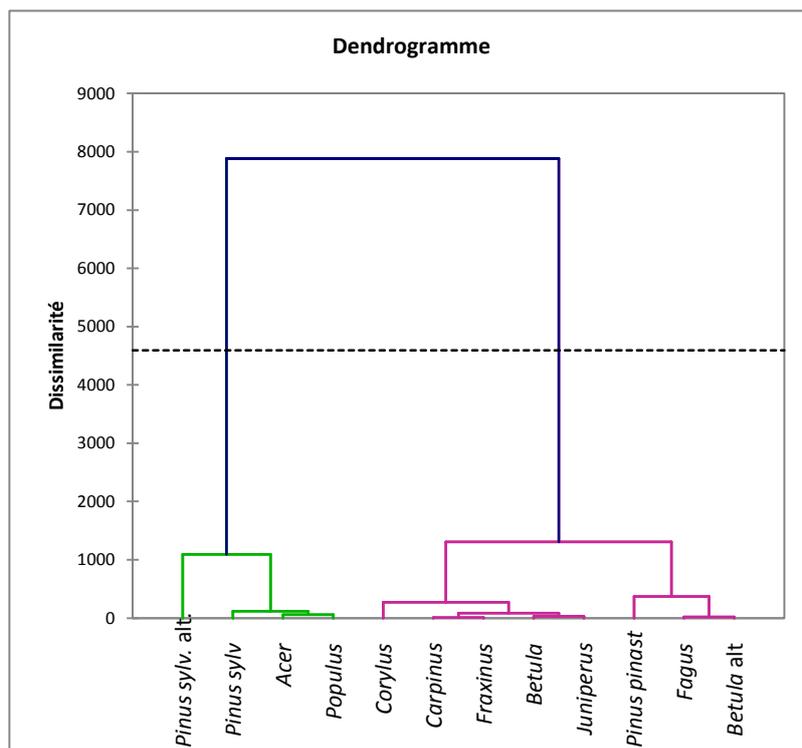


Figure 134 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons à partir du nombre de fragments de la classe]2-4mm] dans les deux lots expérimentaux (les deux espèces de chêne ont été sorties de l'analyse)

Groupe	1	2
Objets	4	8
Somme des poids	4	8
Variance intra-groupe	423.250	298.500
Distance minimale au barycentre	5.274	4.507
Distance moyenne au barycentre	15.480	14.615
Distance maximale au barycentre	28.606	30.163
	<i>Acer</i>	<i>Betula</i>
	<i>Pinus sylv</i>	<i>Carpinus</i>
	<i>Populus</i>	<i>Corylus</i>
	<i>Pinus sylv. alt.</i>	<i>Fagus</i>
		<i>Fraxinus</i>
		<i>Juniperus</i>
		<i>Pinus pinast</i>
		<i>Betula alt.</i>

Figure 135 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH

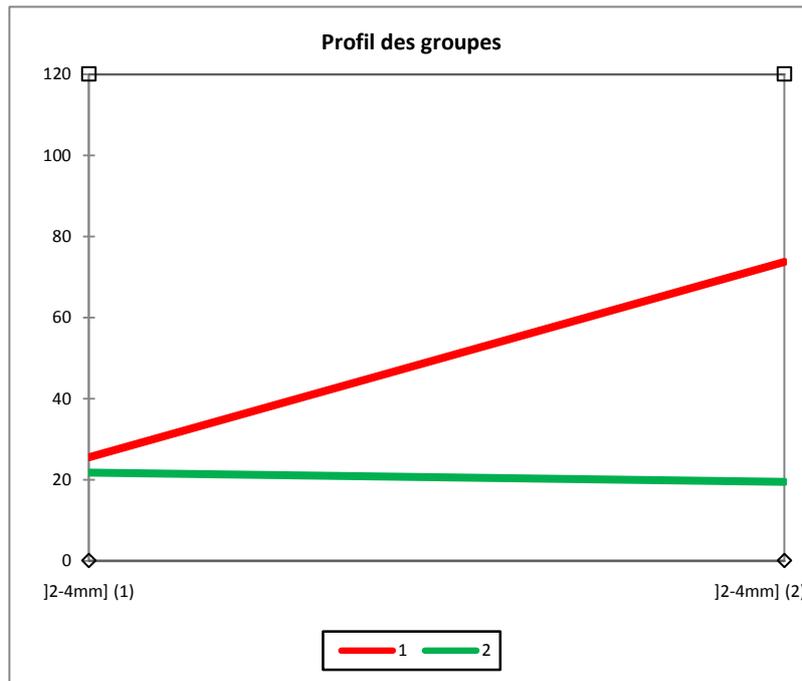


Figure 136 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments dans les deux lots expérimentaux pour la classe]2-4mm]

La dernière classification concerne le nombre de fragments >4mm. Deux groupes majeurs se distinguent. Le premier est composé de *Pinus sylvestris* altéré, *Carpinus*, *Pinus sylvestris*, *Juniperus*, *Corylus*, *Populus*, *Acer* et *Betula* (fig. 137 et 138). La fragmentation de ces taxons est en moyenne légèrement supérieure à celle des taxons du groupe 2, en particulier dans le lot 2 (fig. 139). Le second groupe comprend *Fraxinus*, *Fagus*, *Pinus pinaster* et *Betula* altéré.

Plusieurs sous-ensembles sont visibles. *Pinus sylvestris* sain et altéré ainsi que *Carpinus* sont regroupés du fait de leur fragmentation supérieure (notable en particulier dans le lot 2). Ces trois taxons se distinguent de ce fait du reste des essences du groupe 1. De même *Fraxinus* est isolé dans le groupe 2, du fait de sa très faible fragmentation.

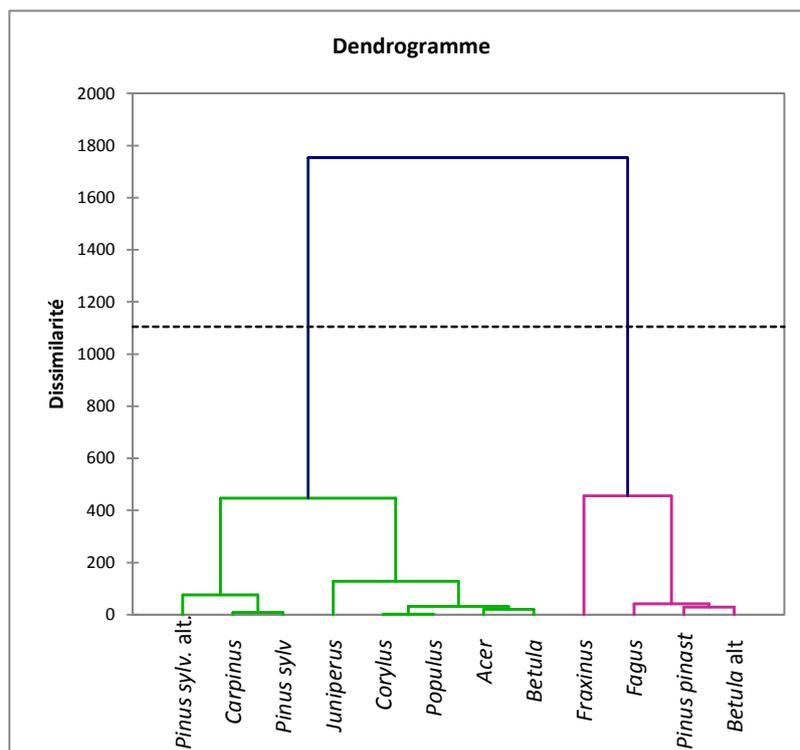


Figure 137 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons à partir du nombre de fragments de la classe >4mm dans les deux lots expérimentaux (les deux espèces de chêne ont été sorties de l'analyse)

Groupe	1	2
Objets	8	4
Somme des poids	8	4
Variance intra-groupe	102.107	175.583
Distance minimale au barycentre	4.707	1.750
Distance moyenne au barycentre	8.818	9.824
Distance maximale au barycentre	16.550	18.495
	<i>Acer</i>	<i>Fagus</i>
	<i>Betula</i>	<i>Fraxinus</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Pinus pinast</i>
	<i>Corylus</i>	<i>Betula alt.</i>
	<i>Juniperus</i>	
	<i>Pinus sylv</i>	
	<i>Populus</i>	
	<i>Pinus sylv. alt.</i>	

Figure 138 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH

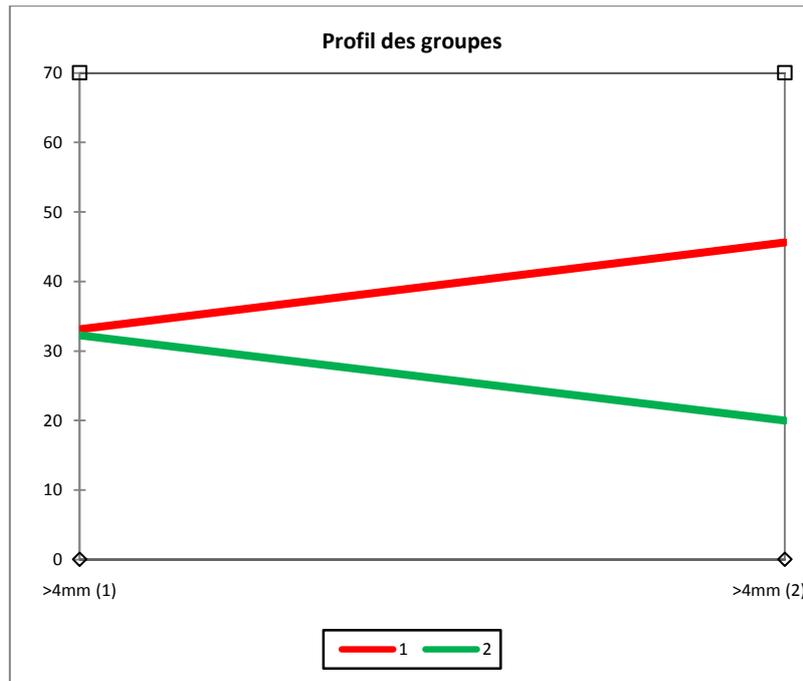


Figure 139 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments dans les deux lots expérimentaux pour la classe >4mm

IV.2.2.4. Facteurs incidents sur la fragmentation

Nous avons testé l'incidence des variables « volume » (V), « masse volumique » (MV), l'indice de porosité [bois initial/bois final] (P indice) et la porosité globale de l'échantillon (P globale) sur l'intensité de la fragmentation (Nb. Fragts).

La matrice des corrélations de Spearman met en évidence une corrélation positive entre le volume des fragments initiaux et le nombre de fragments produits à l'issue de l'expérimentation (fig. 140).

Variables	V	MV	P indice	P globale	Nb. Fragts.
V	1	0.016	0.201	0.304	0.430
MV	0.016	1	0.467	-0.382	0.001
P indice	0.201	0.467	1	0.042	0.237
P globale	0.304	-0.382	0.042	1	0.361
Nb. Fragts.	0.430	0.001	0.237	0.361	1

Figure 140 : Matrice des corrélations de Spearman (les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha 0.05)

Variables	V	MV	P indice	P globale	Nb. Fragts.
V	1	0.000	0.040	0.092	0.185
MV	0.000	1	0.218	0.146	0.000
P indice	0.040	0.218	1	0.002	0.056
P globale	0.092	0.146	0.002	1	0.131
Nb. Fragts.	0.185	0.000	0.056	0.131	1

Figure 141 : Coefficients de détermination de Spearman

Le lien est toutefois assez faible ainsi que l'indique les coefficients de détermination de Spearman. Seulement 18.5% de la variation de la fragmentation est expliquée par le volume initial des fragments déposés dans les cavités remplies de sable (fig. 141). La puissance du test est seulement de 55%. D'après ce test, la masse volumique et la porosité n'influencent pas la fragmentation produite par le piétinement au cours de notre essai.

On note à nouveau par ailleurs une corrélation positive entre la masse volumique et l'indice de porosité, et une corrélation négative entre la porosité globale et la masse volumique. En effet, les espèces qui présentent la zone poreuse la plus importante (et donc un indice de porosité important) sont aussi les plus denses (*Quercus*, *Fraxinus* notamment). Inversement, les taxons globalement très poreux, tels *Populus* par exemple, sont parmi les espèces les moins denses. Ces liens sont donc logiques, mais induits par quelques essences aux valeurs extrêmes. Le degré de corrélation mis en évidence est à peu de chose près semblable à celui qui lie le volume et la fragmentation, lequel est essentiellement induit par le gros volume des fragments initiaux des deux espèces du genre *Quercus*, taxons les plus fragmentés dans cette expérience (cf. nuage de points en annexe IV.4.2.).

IV.3. Expérience 2

IV.3.1. Protocole expérimental (Planche 10, annexe IV.)

IV.3.1.1. Mise en place des cellules expérimentales et composition des échantillons

Cette expérimentation a été mise en place par l'équipe en charge de la fouille de l'abri Castanet (Sergeac, Dordogne, France), qui a aimablement accepté d'inclure nos charbons de bois aux côtés des autres matériaux initialement prévus. Deux cellules expérimentales destinées à tester les effets du piétinement sur divers types de vestiges

archéologiques ont été installées le 23 juin 2007 à proximité de l'abri Castanet par Laurent Chiotti, Sandrine Costamagno, Catherine Cretin et Randall White avec la participation de Clément Ménard. L'expérience s'est déroulée pendant les campagnes de fouilles de 2007 et 2008, soit pendant environ 13 semaines. Les cellules sont installées, à l'abri de la pluie, sur le trajet quotidien des fouilleurs, qui évoluent le plus souvent pieds nus ou chaussés de chaussures légères.

Deux carrés d'environ 70 cm de côté et 25 cm de profondeur sont creusés, recouverts d'une bâche plastique permettant d'isoler le contenu des cellules. Des plaquettes sont disposées au fond et recouvertes de sédiment. Le matériel expérimental - os frais et os brûlés à différents stades de carbonisation, lamelles de silex de très petite taille, coquilles immatures d'espèce *Nassarius* et charbons de bois - est installé au-dessus de ce dispositif. Le matériel est ensuite recouvert de 10 à 15 cm d'une matrice sédimentaire, dont la granulométrie varie d'une cellule à l'autre.

La première cellule contient des sédiments calcaires fins inférieurs à 5mm, tandis que la seconde contient des sédiments beaucoup plus hétérométriques (sables, cailloutis et plaquettes pluricentimétriques).

L'épaisseur du dépôt au-dessus des pièces, relativement importante (10 à 15cm), s'est imposée du fait de la taille de certains os.

Les charbons de bois de 7 taxons - *Betula pubescens*, *Carpinus betulus*, *Olea europea*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Populus alba*, *Quercus pubescens* - sont inclus dans chacune des cellules (15 fragments par taxon dans chaque cellule). Le matériel expérimental provient des résidus de combustions (>4mm) réalisées par I. Théry-Parisot et M. Ntinou (Programme ACI, ITP, dir.). Il s'agit des mêmes lots de charbons que ceux utilisés lors des expériences de plein air à Gavarnie (chapitre IV, § 1.4.2.).

IV.3.1.2. Traitement du matériel expérimental

Après 13 semaines de dépôt, les deux cellules ont été fouillées par passes régulières d'environ 3cm. Le matériel de taille importante a été prélevé directement à la fouille et le sédiment encaissant a été tamisé à l'eau sur une colonne de tamis]0.5-1mm],]1-2mm],]2-4mm], >4mm. Pour les deux mailles les plus fines, nous avons pratiqué une flottation

manuelle pour permettre la récupération des charbons de bois de petite taille¹², tandis que les refus de tamis]2-4mm] et >4mm ont été triés manuellement après leur séchage à température ambiante.

Les charbons issus des différents taxons ayant été déposés sans séparation dans les cellules expérimentales, ils ont du faire l'objet d'une identification taxonomique à l'issue du tamisage et du séchage. L'intégralité des fragments de charbons supérieurs à 1mm ont été identifiés au microscope photonique à réflexion afin de permettre l'analyse taxonomique de la fragmentation. Comme lors du traitement des résultats de Gavarnie, les charbons de *Pinus halepensis* et *Pinus pinaster*, dont l'identification peut prêter à confusion, ont été réunis sous le dénominateur commun « *Pinus (h. et p.)* »¹³.

La classe]0.5-1mm] était mélangée à l'issue de la flottation avec de nombreux débris végétaux. Le tri d'une partie de ces refus de tamis a permis une évaluation du nombre de très petits fragments (poussière de charbon <1mm).

IV.3.2. Présentation des résultats

IV.3.2.1. Fragmentation des charbons de bois dans les deux cellules expérimentales : observations générales

Taxon	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total >1mm	Nb. initial Fragts.	Facteur d'augment° Nb. Fragts.
<i>Betula pubescens</i>	8	2	24	34	15	2.27
<i>Carpinus betulus</i>	12	0	24	36	15	2.40
<i>Olea europea</i>	3	7	22	32	15	2.13
<i>Pinus (h. et p.)</i>	27	5	21	53	15	3.50
<i>Populus alba</i>	17	14	29	60	15	4.00
<i>Quercus pubescens</i>	14	0	15	29	15	1.93

Tableau 32 : Fragmentation des taxons dans la cellule 1 (sédiment fin)

¹² Étaient présents lors du démontage : Jean-Christophe et Valérie Castel, Laurent et Matthieu Chiotti, Julia Chrzavzez, Marie-Pierre Coumont, Catherine Cretin, Magali Gerbe et Randall White.

¹³ Le nombre de fragments et les différentes valeurs présentées dans cette partie correspondent donc pour ce taxon à la moyenne des deux essences.

Taxon	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total >1mm	Nb. initial Frags.	Facteur d'augment° Nb. Frags.
<i>Betula pubescens</i>	23	16	25	64	15	4.27
<i>Carpinus betulus</i>	12	10	28	50	15	3.33
<i>Olea europea</i>	5	12	22	39	15	2.60
<i>Pinus (h. et p.)</i>	14	14	25	54	15	3.58
<i>Populus alba</i>	15	16	30	61	15	4.07
<i>Quercus pubescens</i>	15	9	16	40	15	2.67

Tableau 33 : Fragmentation des taxons dans la cellule 2 (sédiment hétérométrique)

Quinze fragments de charbon par taxon sont initialement été déposés au sein de chaque cellule. Le matériel expérimental, recouvert de 10 à 15cm de sédiment, montre après 13 semaines de piétinement quotidien, une fragmentation globalement réduite. Dans la cellule expérimentale à matrice sédimentaire fine (inférieur à 5mm), le nombre total de fragments (toute classes de taille confondues) oscille selon les taxons entre 29 et 60, soit environ deux à 4 fois plus de fragments qu'initialement (tableau 32).

Dans la seconde cellule, à matrice sédimentaire hétérométrique, le nombre total de fragments est compris entre 39 et 64, soit de 2.60 à 4.27 fois plus de fragments qu'au départ de l'expérimentation (tableau 33).

Le facteur d'augmentation du nombre de fragments est donc globalement faible dans l'une comme dans l'autre des cellules.

La fraction inférieure (classe]0.5-1mm]), qui a fait l'objet d'une évaluation quantitative, contient au minimum 4000 micro-fragments par cellule.

IV.3.2.2. Homogénéité de la fragmentation dans les deux cellules expérimentales

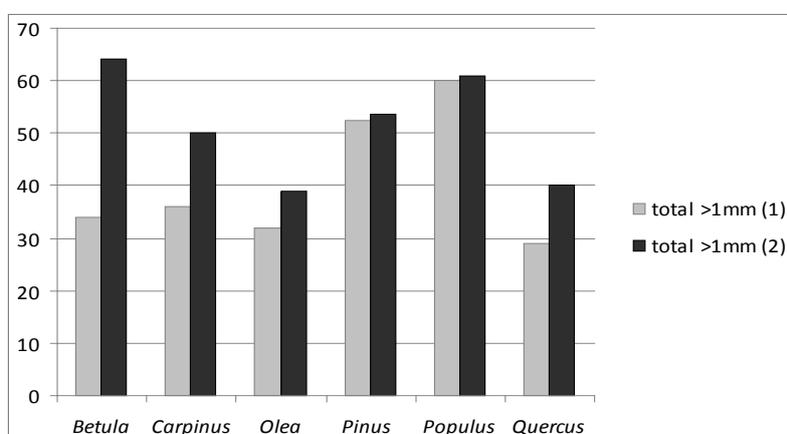


Figure 142 : Nombre total de fragments >1mm par taxon dans les deux cellules expérimentales

Le nombre de fragment par taxon varie d'une cellule à l'autre, en particulier dans le cas de *Betula* (dont le nombre total de fragments passe quasiment du simple au double entre les deux cellules) et de *Carpinus*. En dehors de ces deux taxons, la fragmentation des différentes essences est assez proche dans les deux cellules.

Les différents tests (annexe IV.4.3.) de variance, de position des échantillons et les tests t et z^{14} mis en œuvre à partir de nos données indiquent que les deux échantillons proviennent de la même population. Il n'y a donc **pas de différences statistiquement significatives dans la fragmentation des charbons d'un lot à l'autre**. Il faut toutefois noter que le nombre de fragments est toujours supérieur, quel que soit le taxon considéré, dans la cellule 2 caractérisée par une matrice sédimentaire plus grossière que celle de la cellule 1.

IV.3.3. Analyse statistique de la fragmentation

- *Nombre de fragments par classe de taille*

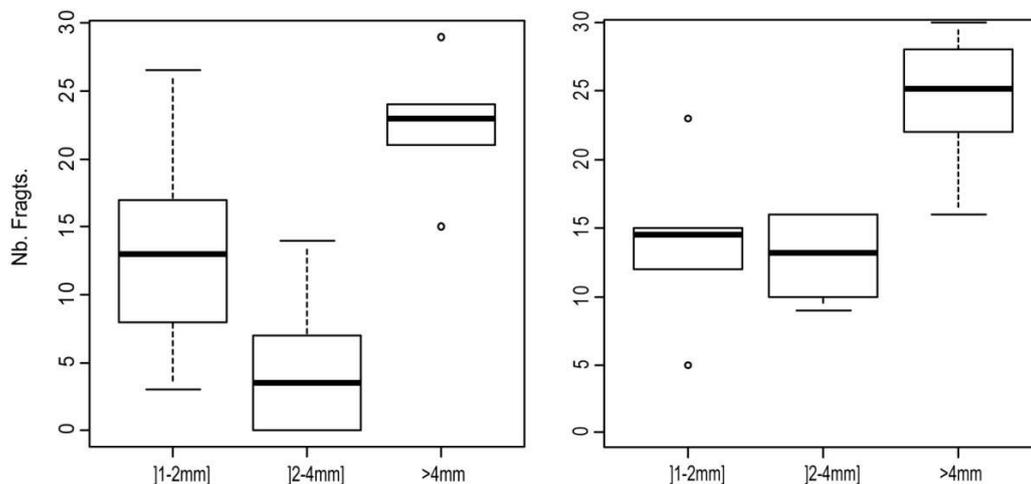


Figure 143 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille dans les deux cellules expérimentales (à gauche, sédiment fin ; à droite, sédiment hétérométrique)

¹⁴ Exceptionnellement, les valeurs [nombre de fragments par classe de taille pour chaque taxon mis bout à bout] suivent la loi normale ($n = 6$ taxons \times 3 classes de taille = 18). Des tests paramétriques ont donc pu être mis en œuvre.

Statistiques descriptives	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total >1mm	Facteur d'augment° Nb. Fragts.
Minimum	3	0	15	29	1.93
Maximum	27	14	29	60	4
Moyenne	13.5	4.7	22.5	40.6	2.7
Médiane	13	3.5	23	35	2.3
Écart-type (n)	7.351	4.888	4.193	11.483	0.766
Coefficient de variation	0.548	1.047	0.186	0.283	0.283

Tableau 34 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille dans la cellule 1 (sédiment fin)

Statistiques descriptives	]1-2mm]	]2-4mm]	>4mm	total >1mm	Facteur d'augment° Nb. Fragts.
Minimum	5	9	16	39	2.6
Maximum	23	16	30	64	4.3
Moyenne	14	12.9	24.4	51.3	3.4
Médiane	14.5	13.2	25.2	51.8	3.5
Écart-type (n)	5.292	2.760	4.507	9.501	0.633
Coefficient de variation	0.378	0.214	0.185	0.185	0.185

Tableau 35 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille dans la cellule 2 (sédiment hétérométrique)

La distribution du nombre de fragments par classe de taille est relativement hétérogène et diffère quelques peu entre les deux cellules expérimentales (fig. 143). Dans la cellule 1 (sédiment fin), la classe]1-2mm] contient entre 3 et 27 fragments, la classe]2-4mm] contient au maximum 14 fragments, mais n'en compte parfois aucun. C'est dans cette classe que le coefficient de variation est le plus fort. Enfin, la classe >4mm compte de 15 à 29 fragments, soit un peu moins du double de fragments initialement déposés (tableau 34).

Dans la cellule 2, la classe]1-2mm] compte de 5 à 23 fragments, chiffres assez proche de ceux de la première cellule. En revanche, la classe]2-4mm] présente en moyenne 12.9 fragments, ce qui est bien plus que dans la cellule précédente (4.7 fragments en moyenne). La dernière classe de taille diffère peu par rapport à la cellule 1, elle est à peine mieux représentée avec 16 à 30 fragments. La variabilité de la fragmentation dans la cellule 2 est globalement beaucoup moins importante que dans la cellule 1 (tableau 35 et fig. 143).

La dernière classe de taille (>4mm) est celle qui compte le plus de fragments (figure 143), les deux autres classes ne sont que très faiblement représentées, en particulier la classe]2-4mm] dans la cellule 1. Cette configuration est tout à fait exceptionnelle dans nos

expérimentations. Le dépôt initial était composé de 15 fragments >4mm, il est donc normal que cette classe soit bien représentée, mais **la rareté des petits fragments montre la très faible fragmentation des charbons** initialement déposés au sein des deux cellules expérimentales.

- *Nombre de fragments par classe de taille : différences taxonomiques*

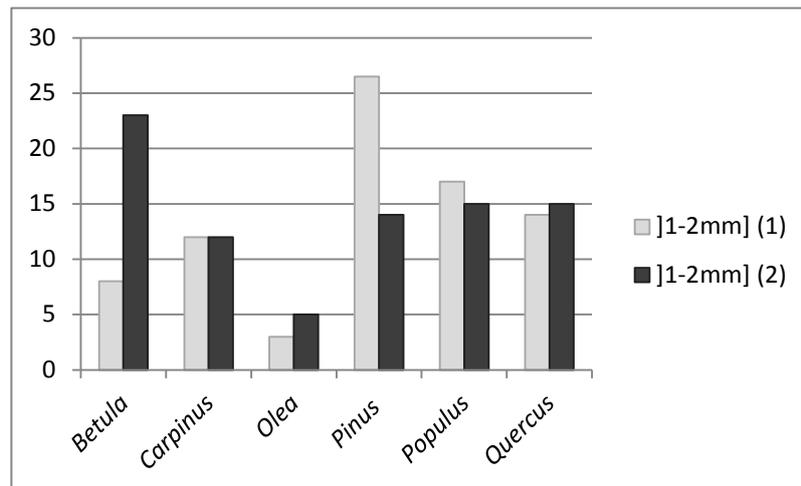


Figure 144 : Nombre de fragments par taxon dans la classe]1-2mm]

La fragmentation dans la classe]1-2mm] est relativement équivalente dans les deux cellules pour la majorité des taxons. Seul *Betula* est bien plus fragmenté dans la cellule 2 et *Pinus* dans la cellule 1. Par ailleurs, il y a peu de différence de fragmentation entre les taxons. Seul *Olea* présente une fragmentation plus réduite que les autres espèces dans les deux cellules (fig. 144).

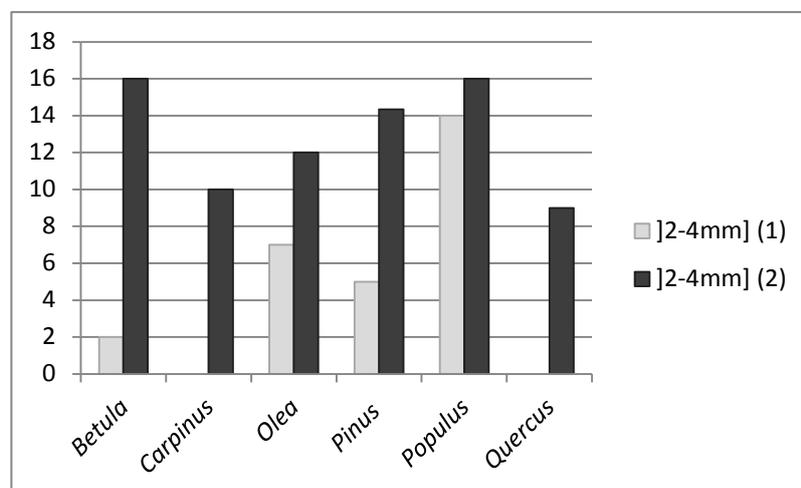


Figure 145 : Nombre de fragments par taxon dans la classe]2-4mm]

Dans la classe]2-4mm] (fig. 145), la fragmentation est en revanche plus hétérogène comme nous l'avons déjà évoqué. En premier lieu, le nombre de fragments est bien inférieur pour tous les taxons dans la première cellule (sédiment fin). *Carpinus* et *Quercus* ne comptent aucun fragment dans cette classe dans la première cellule. Le reste des taxons compte un nombre variable de fragments ; il est très faible pour *Betula* et plus important pour *Populus*. Dans la seconde cellule, tous les taxons présentent des fragments dans la classe]2-4mm] et celle-ci est mieux représentée quel que soit le taxon considéré. Par ailleurs, le nombre de fragments est moins hétérogène entre les taxons eux-mêmes.

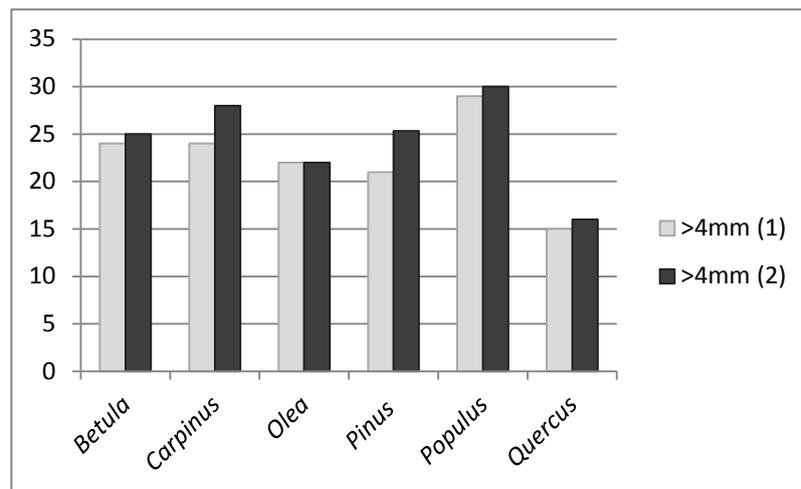


Figure 146 : Nombre de fragments par taxon dans la classe >4mm

Enfin, dans la classe >4mm, la fragmentation est à nouveau moins hétérogène entre les taxons. Seul *Quercus* présente moins de fragments que les autres espèces dans les deux cellules ; ce taxon n'est quasiment pas fragmenté dans la masse du charbon.

Le nombre de fragments dans la cellule 2 est supérieur ou égal à celui de la cellule 1, mais jamais inférieur, quel que soit le taxon considéré.

En incluant toutes les valeurs disponibles par taxon (n = 3 classes de taille x 2 cellules expérimentales = 6), **le test non paramétrique de Kruskal-Wallis ne met pas en évidence de différences significatives entre les essences** (fig. 147).

K	5.490
p-value (bilatérale)	0.373
alpha	0.05

Figure 147 : Résultat du test de Kruskal-Wallis

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes
<i>Olea</i>	6	81.500	13.583	A
<i>Quercus</i>	6	85.500	14.250	A
<i>Carpinus</i>	6	99.000	16.500	A
<i>Betula</i>	6	121.500	20.250	A
<i>Pinus</i>	6	127.500	21.250	A
<i>Populus</i>	6	151.000	25.167	A

Figure 148 : Comparaisons multiples par paires (test de Dunn, procédure bilatérale, niveau de signification corrigé de Bonferroni 0.0033)

De même, la procédure de comparaisons par paires (fig. 148) **ne distingue aucun taxon**, qui tous appartiennent à un seul et même groupe.

- *Classification des taxons en fonction du nombre de fragments produits dans les trois classes de taille*

La classification ascendante hiérarchique permet de distinguer deux groupes (fig. 149 et 150) dont les profils sont légèrement différents. En moyenne, *Pinus* et *Populus* se fragmentent légèrement plus que les autres taxons (fig. 151) dans les deux lots et pour toutes les classes de tailles.

Toutefois, l'inertie intra-groupe est cette fois-ci de 77.44% tandis que l'inertie inter-groupe est seulement de 22.56%, confirmant bien qu'il existe très peu de différences entre les taxons.

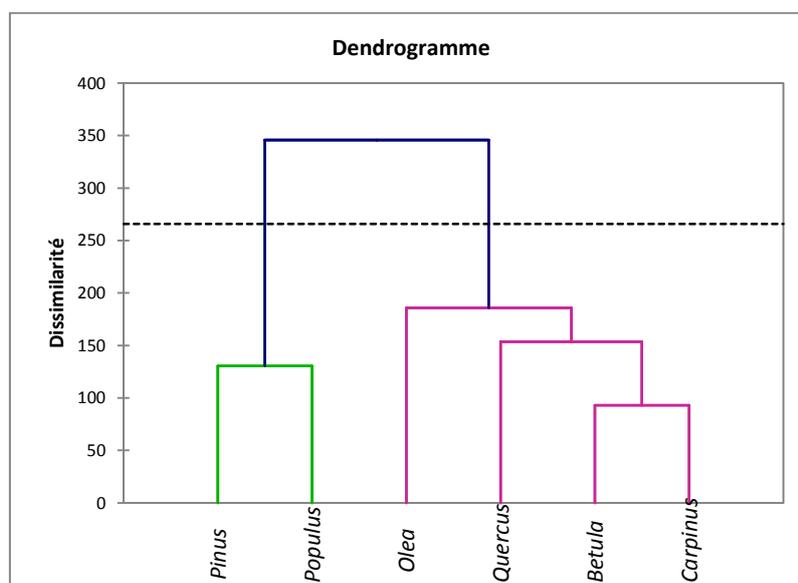


Figure 149 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction de leur fragmentation

Groupe	1	2
Objets	4	2
Somme des poids	4	2
Variance intra-classe	144.167	130.403
Distance minimale au barycentre	7.340	8.075
Distance moyenne au barycentre	10.255	8.075
Distance maximale au barycentre	11.806	8.075
	<i>Betula</i>	<i>Pinus</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Populus</i>
	<i>Olea</i>	
	<i>Quercus</i>	

Figure 150 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH

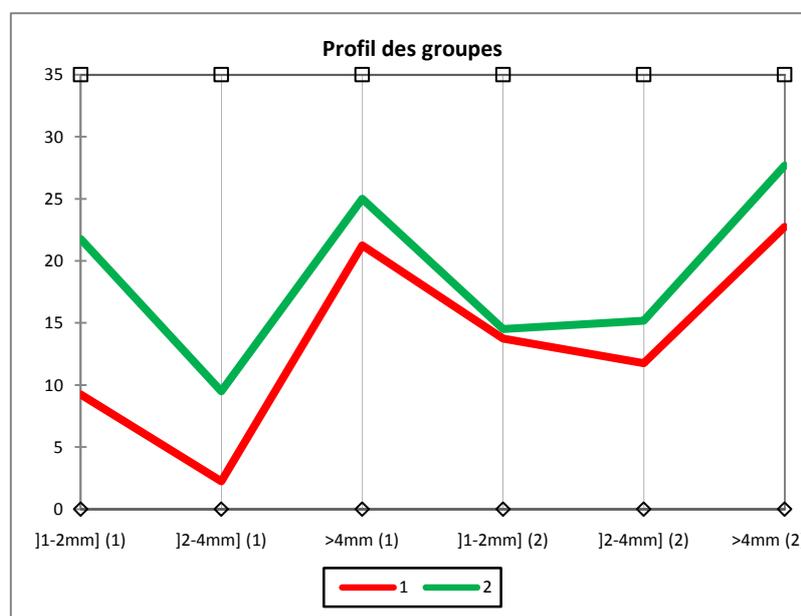


Figure 151 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments dans les deux lots expérimentaux pour la classe >4mm

IV.4. Synthèse, comparaison et discussion des résultats

Dans l'expérience 1 :

- ✓ le piétinement génère une **importante fragmentation** des taxons (tableaux 30 et 31)
- ✓ l'intensité de cette **fragmentation varie entre les taxons**. Les deux extrêmes sont constitués par *Quercus pubescens* se fragmentant beaucoup et *Fagus* se fragmentant très peu (fig. 120 et 127). Si l'on s'en tient aux divisions majeures, les classifications ascendantes hiérarchiques permettent également de distinguer *Pinus sylvestris* sain, *Pinus sylvestris* altéré et *Populus* qui produisent en moyenne moins de fragments que

les deux espèces du genre *Quercus*, mais plus que tous les autres taxons et cela dans toutes les classes de taille. *Acer* se joint à ces trois essences dans la classe >4mm (fig. 131, 134, 137)

- ✓ la fragmentation des taxons entre les deux lots d'échantillons est plus hétérogène que dans les expériences précédemment présentées, signifiant sans doute par là un **effet plus aléatoire du piétinement sur les charbons de bois** (fig. 121)
- ✓ la faible corrélation mise en évidence entre volume initial des fragments de charbon utilisés et fragmentation ne suffit pas à expliquer les différences de résultats entre taxons ; **aucun critère physique (porosité, masse volumique) n'a d'incidence sur la fragmentation** dans cette expérience (fig. 140 et 141)

Dans l'expérience 2 :

- ✓ le piétinement génère une **fragmentation très réduite** des charbons de bois
- ✓ cette fragmentation est relativement homogène entre les taxons
- ✓ l'effet induit par l'expérimentation est toujours légèrement plus important dans la cellule 2, laquelle contenait une matrice plus grossière que celle de la cellule 1 composée de sédiment fins (<5mm).

Les résultats sont donc variables d'une expérimentation à l'autre. Dans un cas le piétinement produit une importante fragmentation, tandis que dans l'autre, celle-ci est très réduite.

Or, dans la première expérimentation, les charbons de bois affleuraient à la surface du sédiment, tandis que dans la seconde, ils étaient recouverts de 10 à 15cm de sédiment. Même si le protocole n'est pas identique (piétinement intensif sur une après-midi dans la première expérience / piétinement quotidien pendant 13 semaines dans la seconde), ce résultat signifie clairement qu'**une fois enfouis, les charbons de bois sont très peu affectés par les phénomènes de piétinement**, lesquels ne sont réellement incident que lorsque le matériel n'est pas, ou faiblement recouvert. **La vitesse de sédimentation** apparaît alors comme un **facteur majeur de conservation** des dépôts anthracologiques.

De même, bien qu'aucune différence de fragmentation n'ait pu être mise en évidence sur le plan statistique entre les deux cellules expérimentales de Castanet, il nous semble significatif que le nombre de fragments soit toujours – pour tous les taxons et quelle que soit la classe de taille considérée – plus élevée dans la cellule à matrice grossière.

C'est particulièrement vrai dans le cas de la classe de taille]2-4mm], qui est très faiblement, voire pas représentée dans la cellule 1 et, en comparaison, toujours bien mieux représentée dans la cellule 2 (fig. 143 et 145). La granulométrie de la matrice sédimentaire est le seul paramètre qui change dans la mise en œuvre de l'expérimentation entre les deux cellules. Aussi, la variation du nombre de fragments d'une cellule à l'autre, et en particulier de la représentation de la classe]2-4mm], qui signe à l'évidence une fragmentation dans la masse plus accomplie, peut être mise en lien avec la composition de la matrice sédimentaire.

La **granulométrie du sédiment** semble avoir une incidence sur l'intensité de la fragmentation induite par le piétinement. Les **sédiments grossiers apparaissent plus destructeurs** que les sédiments fins.

Synthèse et conclusion du chapitre V

Plusieurs types de processus, envisagés comme étant potentiellement destructeurs pour les charbons de bois en contexte archéologique, ont été expérimentalement mis en œuvre, « *in vivo* » ou « *in vitro* ». À l'issue de ces expériences, dont les résultats sont présentés au chapitre V, il apparaît que le principal effet induit concerne la fragmentation du matériau. Toutefois, celle-ci est d'intensité variable selon les processus en jeu et selon les taxons.

L'exposition prolongée aux agents atmosphériques comme les alternances de retraits et gonflements du sédiment sont à même d'induire une importante fragmentation du matériau. En revanche, l'alternance de phases d'imbibition et de séchage du charbon ne génère qu'un très léger délitement de la matière, à peine supérieur aux effets du maintien prolongé des charbons de bois en eau, lesquels effets ne varient pas en fonction du pH du milieu dans notre essai. Le piétinement apparaît comme un agent potentiellement destructeur, mais seulement lorsque les charbons sont faiblement recouverts. Une fois enfoui, il semble que le matériau résiste bien aux pressions réduites qu'entraîne un piétinement récurrent de la surface du sol. De même, la granulométrie de la matrice sédimentaire apparaît comme un facteur de variabilité de l'intensité du processus de fragmentation induit par le piétinement. Un sédiment fortement hétérométrique est plus destructeur qu'une matrice fine.

Le charbon de bois n'est donc pas également affecté par les différents processus que nous avons testés.

Par ailleurs, pris individuellement, les taxons présentent des réactions qui varient d'un contexte expérimental à l'autre. Certaines propriétés physiques permettent en partie d'expliquer cette variation de comportement.

Les essences les plus poreuses (non pas nécessairement au sens de la présence d'une zone poreuse bien prononcée, mais au sens d'une proportion élevée de vides au sein de la matière) sont les plus affectées par le processus de météorisation et par l'alternance de cycles d'imbibition-dessiccation directe des charbons de bois – bien que celle-ci génère globalement peu d'effets –. Dans le cas des cycles de retraits-gonflements du sédiment, la faiblesse de la masse volumique des taxons semble déterminante dans leur fragmentation.

Toutefois, ceci doit être nuancé du fait que le protocole expérimental, tel qu'il est mis en œuvre, génère essentiellement des forces de traction et très peu de forces de compression. L'importance de la masse volumique ayant au contraire été identifiée comme étant en partie responsable de l'intensité de la fragmentation lorsque des contraintes en compression s'exercent (chapitres III et IV), il faut alors supposer qu'en contexte naturel, les retraits et gonflements du sédiment – qui génèrent des forces de compression et de traction – doivent induire la fragmentation des taxons de manière relativement indifférenciée.

Enfin, le piétinement produit une réaction plus variable et aléatoire des taxons, laquelle peut en partie dépendre, outre l'anisotropie naturelle du matériau, de la taille initiale des fragments inclus dans la matrice. Au-delà d'un certain volume, un effet d'échelle semble partiellement expliquer la variabilité du comportement observé. Toutefois, l'intensité de la fragmentation concerne en particulier les deux espèces du genre *Quercus* et il faut donc envisager une forte incidence des caractéristiques anatomiques sur l'expression de cet effet d'échelle. Le chêne présente en effet des zones de faiblesse plus importantes et nombreuses que les autres taxons – et dont nous avons vu au chapitre III qu'elles ont une forte influence sur sa fragmentation –. Ici, les deux espèces du genre sont celles dont les fragments initiaux étaient de loin les plus volumineux, ceux-ci ayant produit *in fine* un nombre beaucoup plus important de particules. Il est clair que plus le charbon est volumineux, plus les zones de faiblesse (zones poreuses, rayons ligneux multisériés) sont nombreuses et donc plus le matériau est à même de se rompre en de multiples fragments.

CHAPITRE VI

SYNTHÈSE ET DISCUSSION : CONSERVATION ET REPRÉSENTATIVITÉ DES CHARBONS DE BOIS EN CONTEXTE ARCHÉOLOGIQUE

I. LE PROCESSUS DE FRAGMENTATION : REPRISE SYNTHÉTIQUE DES RÉSULTATS

Nous avons prêté une attention particulière, tout au long de ce travail, au processus de fragmentation des charbons de bois. D'une part parce qu'il constitue le principal effet observé à l'issue de chacune des sollicitations mise en œuvre, mais aussi parce que la fragmentation demeure un questionnement majeur pour les anthracologues qui, pour la plupart, fondent en partie leurs interprétations sur la variation des fréquences relatives des taxons.

Au-delà des biais potentiellement induits par la collecte du bois par les groupes humains, et ceux résultants des transformations physico-chimiques liées à la phase de combustion, les processus post-dépositionnels sont-ils en mesure de produire des sous ou surreprésentations de certains taxons suffisamment importantes pour biaiser l'information paléoécologique et palethnologique ? Certains processus sont-ils plus ou moins dommageables pour le matériau et peuvent-ils être mis en évidence par l'anthraco-analyse ? Dans l'objectif de répondre à ces premières questions, nous reprenons ci-après de manière synthétique, les résultats relatifs à la fragmentation des charbons de bois acquis au cours de notre travail.

I.1. Fragmentation par expérimentation

I.1.1. L'augmentation du nombre total de fragments

La figure 152 présente la distribution moyenne de la fragmentation par expérimentation, tous taxons confondus. De manière à rendre les résultats comparables, nous considérons ici, le facteur d'augmentation du nombre total de fragments (nb. total fragts. produits/nb. fragts. initial) par expérimentation (la fraction [0.5-1mm] qui n'a pas toujours été quantifiée et qui n'est que très rarement prise en compte dans l'anthraco-analyse est ici exclue). Dans le cas de Gavarnie, nous utilisons le « facteur d'augmentation relatif » du nombre de fragments par cellule (lequel prend en compte la perte de matériel

importante propre à cette expérimentation) qui exprime plus justement l'état de fragmentation réel (cf. chapitre IV, § I.3.1.3.)¹⁵.

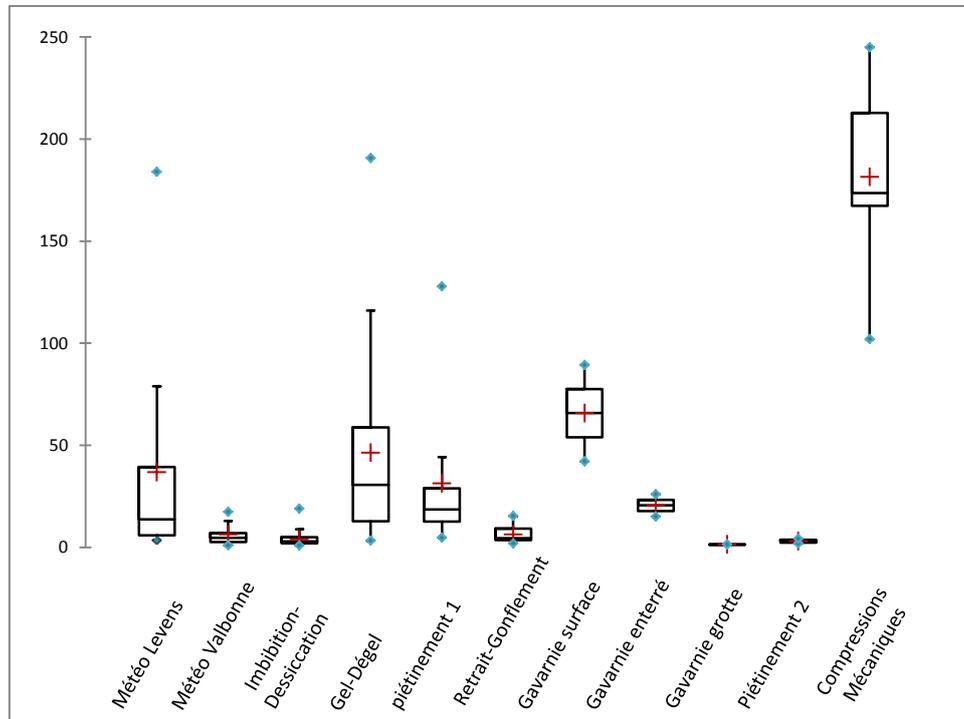


Figure 152 : Facteur d'augmentation du nombre total de fragments >1mm par expérimentation

Statistique	Météo Levens	Météo Valbonne	Imbibition-Dessiccation	Gel-Dégel	Piétinement 1	Retrait-Gonflement	Gavarnie Surface	Gavarnie Enterré	Gavarnie Grotte	Piétinement 2	Compressions Mécaniques
Minimum	3.5	1.0	1.0	3.3	4.8	2.0	42.1	15.2	1.8	1.9	102.0
Maximum	184.0	17.5	19.0	190.7	127.9	15.4	89.4	26.1	1.8	4.3	245.0
Médiane	13.8	4.8	3.0	30.7	18.6	4.5	65.8	20.6	1.8	3.0	173.5
Moyenne	36.9	6.3	4.0	46.4	31.3	6.3	65.8	20.6	1.8	3.1	181.4
Écart-type (n-1)	50.4	4.8	3.8	47.4	33.3	3.9	33.5	7.7	0.0	0.8	45.4
Coef. variation	1.3	0.8	0.9	1.0	1.0	0.6	0.4	0.3	0.0	0.3	0.2

Tableau 36 : Statistiques descriptives du facteur d'augmentation du nombre total de fragments >1mm par expérimentation

¹⁵ Le détail des valeurs par taxon n'étant pas connu pour toutes les cellules à Gavarnie, nous travaillons à partir des valeurs moyennes par cellule et par type de dépôt pour les deux années de prélèvement pour lesquelles la fraction fine est quantifiée, la médiane et la moyenne sont donc ici identiques. De même, un seul prélèvement a été pratiqué dans la grotte du Névé, il est inclus ici à titre de comparaison.

À titre indicatif, nous avons fait figurer les résultats obtenus au chapitre III au cours des essais de compressions mécaniques axiales. On notera d'emblée qu'aucune des « mises en situation réelle » n'atteint les niveaux de fragmentation très élevés résultants de ces essais. Seules les valeurs extrêmes des tests de météorisation de la station de Levens, ceux des simulations de cycles gel-dégel et de la première expérience de piétinement (matériel affleurant à la surface du sol) chevauchent la distribution des valeurs issues des compressions en laboratoire. Mises en place de manière à obtenir des données brutes, caractéristiques des propriétés intrinsèques du matériau et des taxons, la fragmentation induite semble donc peut représentative de celle générée par des processus « naturels ». Il faut y voir un effet du procédé de fabrication, de la forme des échantillons et du mode opératoire : la force appliquée s'exerce en continu et de façon homogène sur toute la surface du cube en contact avec la presse ; elle est donc diffusée simultanément dans la totalité du volume du charbon. De plus, les autres expériences réalisées mettent en jeu des niveaux de pression moins importants ainsi que nous l'avons évoqué au chapitre III. Toutefois, le fait que les valeurs extrêmes obtenues à l'issue des essais de météorisation de Levens, des alternances gel-dégel et de piétinement du matériel affleurant à la surface du sol atteignent ponctuellement les niveaux de fragmentation engendrés par les compressions en laboratoire, montre bien les dommages considérables que ce type de processus peut induire sur le matériel. Il faut par ailleurs envisager en contexte archéologique une exposition prolongée des charbons de bois aux processus simulés ici sur des périodes relativement courtes (trois à quatre années) et donc des effets accentués d'autant.

Si l'on considère la fragmentation moyenne générée par chacune des expériences (hors compression mécanique), les valeurs moyennes maximales concernent les dépôts de surface de Gavarnie (dépôts de plein air à la surface du sol en contexte périglaciaire actuel) les simulations de gel-dégel en conditions contrôlées et l'essai de météorisation réalisé à Levens (dépôt à moyenne altitude) ; le facteur d'augmentation moyen du nombre total de fragments est respectivement de 65.8, 46.4 et 36.9 (tableau 36) pour ces expériences. L'essai de piétinement 1 (matériel affleurant à la surface du sol) et les dépôts enterrés de Gavarnie (plein air, contexte périglaciaire, matériel enfoui à 5cm de profondeur) produisent également une fragmentation importante (la médiane de ces essais est d'ailleurs supérieure à celle de la météorisation de Levens). En revanche, les expérimentations de météorisation

réalisées à Valbonne (dépôt de basse altitude), l'imbibition-dessiccation des fragments, les alternances de retrait-gonflement du sédiment ne produisent qu'une fragmentation réduite, tandis que celle issue du piétinement du matériel enfoui comme du dépôt en Grotte à Gavarnie est quasiment inexistante.

Il faut toutefois rappeler que le nombre de cycles subi par le matériel au cours des simulations de retrait-gonflement du sédiment et d'imbibition-dessiccation des fragments de charbons eux-mêmes est moins élevé que lors des alternances gel-dégel par exemple. De manière à pouvoir comparer ces données aux autres nous avons multiplié les résultats acquis de manière à atteindre 400 cycles¹⁶. Les valeurs observées (figure 108 de l'annexe V) permettent d'envisager que les mouvements sédimentaires de type retrait-gonflement soient au moins aussi destructeurs que le piétinement du matériel affleurant à la surface du sol. Qui plus est, en contexte naturel, les effets des alternances de retrait-gonflement du sédiment doivent être d'autant plus dommageables pour le matériau que les forces de compression, qui sont réduites dans notre protocole expérimental, s'expriment plus intensément. Ainsi, bien que les valeurs de la figure 152 soient basses pour cette expérimentation, il nous semble qu'il faut compter les processus de retrait-gonflement du sédiment parmi les processus pouvant participer de la fragmentation des charbons de bois. En revanche, les dommages issus de l'imbibition-dessiccation des fragments, même multipliés, restent faibles. Ils dépassent toutefois ceux de la météorisation à basse altitude. L'imbibition-dessiccation des fragments étant à Valbonne le processus majoritaire d'altération (les températures y étant relativement hautes et peu variables), on peut supposer qu'une exposition prolongée des charbons de bois dans ce type de contexte, finissent par agir sur le matériau. Les effets étant néanmoins de moindre ampleur que dans le cas de variation thermiques importantes ou lorsque des pressions mécaniques externes s'exercent sur le matériau.

¹⁶ Nous maintenons toutefois les nuances déjà évoquées (p. 238) vis-à-vis de ce procédé, dans la mesure où l'augmentation du nombre de fragments produits n'est sans doute pas corrélée de façon strictement linéaire à l'augmentation du nombre de cycles ; il permet néanmoins de se faire une idée des valeurs potentiellement atteintes lors d'une répétition accrue du processus.

L'observation des modalités de la fragmentation, à savoir la taille des fragments produits, peut permettre de caractériser plus précisément l'impact des différentes sollicitations.

I.1.2. Répartition des fragments par classe de taille

Les figures 153, 154 et 155 présentent successivement le facteur d'augmentation du nombre de fragments produits dans chaque classe de taille ([1-2mm],]2-4mm], >4mm) par expérimentation.

Hormis les tests de compression mécanique, dont nous avons vu qu'ils produisent une fragmentation bien supérieure à celle des autres expérimentations *in vivo* ou *in vitro*, la plus importante production de petits fragments est issue des dépôts de surface de Gavarnie et des simulations d'alternances de gel-dégel. À Levens et dans le cas du piétinement de surface, les valeurs maximales sont égales ou dépassent celles de Gavarnie-surface, mais les valeurs moyennes sont en revanche inférieures ; elles dépassent toutefois légèrement celles des dépôts enterrés de Gavarnie. Les autres expériences qui n'ont généré qu'une faible fragmentation, présentent logiquement un très faible nombre de petits fragments.

Dans la classe médiane (]2-4mm]), le piétinement de surface et l'expérience de gel-dégel présentent des valeurs moyennes beaucoup plus basses que précédemment. La production moyenne de fragments]2-4mm] est toujours importante dans les dépôts de surface de Gavarnie ; elle l'est un peu moins à Levens et dans les dépôts enterrés, mais reste supérieure à celle des autres processus. Les valeurs maximales sont de loin atteintes à Levens et leur distribution recoupe celle des compressions mécaniques.

L'augmentation du nombre de gros fragments (>4mm) est bien plus conséquente à Gavarnie qu'à l'issue de tous les autres processus mis en œuvre, et ce dans les deux types de dépôts ; les valeurs atteintes se rapprochent largement de celles des compressions mécaniques dans le cas des dépôts de surface. Les taux moyens de Levens sont encore légèrement supérieurs aux autres ; la série est toutefois variable en raison de l'hétérogénéité du comportement des taxons.

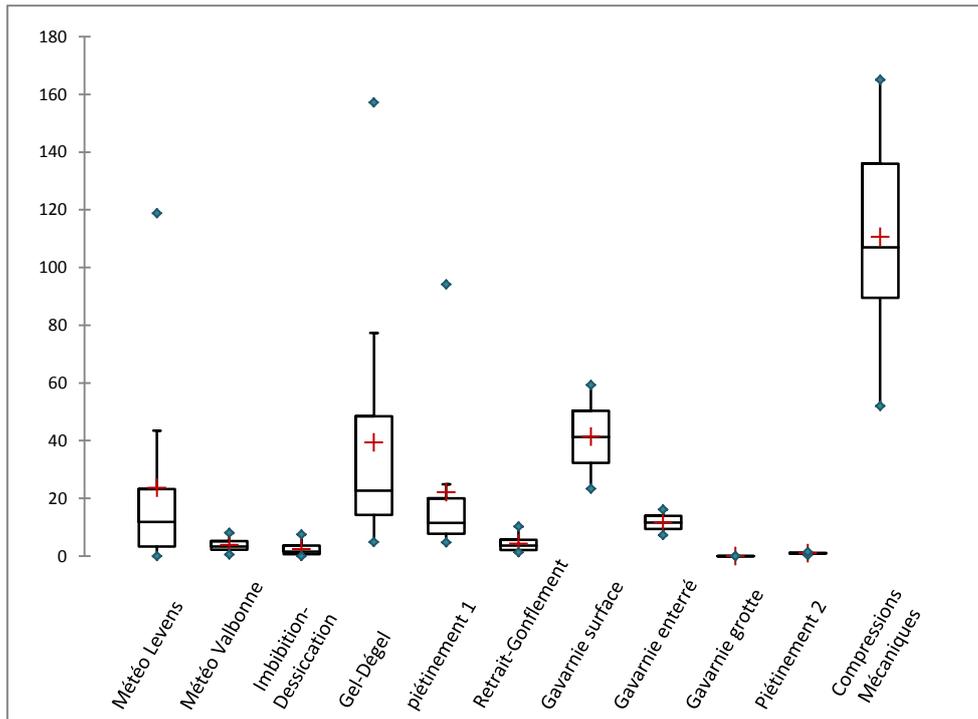


Figure 153 : Facteur d'augmentation du nombre de fragments]1-2mm] par expérimentation

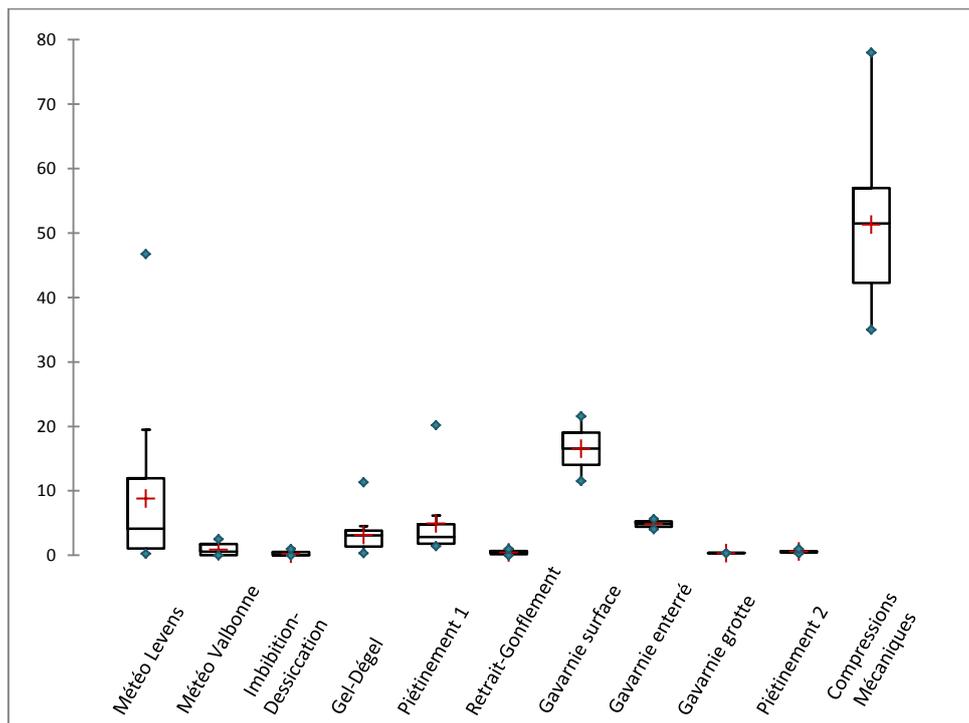


Figure 154 : Facteur d'augmentation du nombre de fragments]2-4mm] par expérimentation

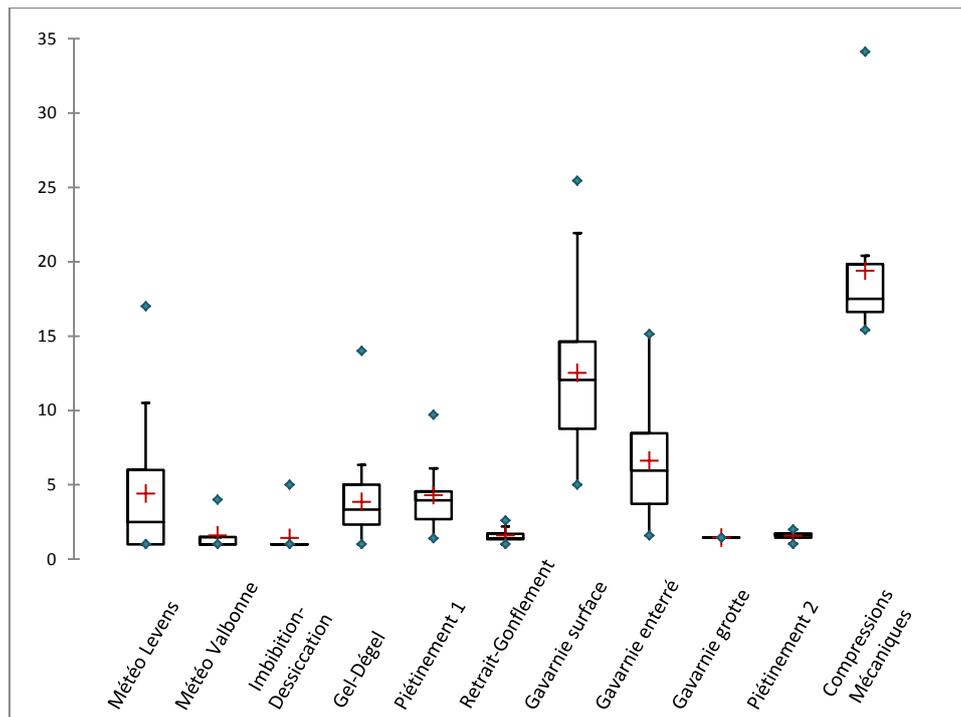


Figure 155 : Facteur d'augmentation du nombre de fragments >4mm par expérimentation

Plusieurs aspects peuvent être soulignés :

i) l'exposition du matériel en surface du sol en **conditions périglaciaires actuelles** a produit la **fragmentation la plus importante**. Le nombre de fragments est largement supérieur à celui généré par les autres expériences quelle que soit la classe de taille considérée. C'est particulièrement notable dans les classes de taille supérieures ([2-4mm] et >4mm), traduisant une **intense fragmentation dans la masse** des charbons initialement déposés dans les cellules de surface comme dans les cellules enfouies. Il faut par ailleurs noter que les valeurs de Gavarnie correspondent aux prélèvements successifs réalisés chaque année et ne représentent donc pas l'état de fragmentation final comme c'est le cas pour les autres expérimentations. Si nous ne considérons que les résultats de la dernière année de prélèvement, la fragmentation est évidemment plus conséquente encore. Le facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments dans la cellule enfouie prélevée en 2010 est de 26, valeur supérieure à la médiane de la plupart des autres expériences.

Dans les cellules de surface, le matériel est soumis simultanément à d'intenses processus météoriques (pluie, neige, vent, variation des températures, de la pression atmosphérique, de l'ensoleillement, etc.) ainsi qu'à l'alternance de cycles gel-dégel (nombreux à la surface

sur sol). Cette combinaison apparaît fort destructrice. Il est d'ailleurs notable que les valeurs atteintes à l'issue des essais de météorisation à Levens (station dans laquelle les températures passent régulièrement la barre des 0°C) et celles issus des alternances gel-dégel en conditions contrôlées soient celles qui se rapprochent le plus des résultats obtenues en plein air à Gavarnie.

ii) **en conditions contrôlées, l'alternance de cycles gel-dégel** – dans les conditions expérimentales qui caractérisent notre essai (gel relativement intense et rapide, matrice sédimentaire très plastique, teneur en eau élevée, nombre de cycles important) – produit en moyenne **beaucoup de petits fragments** et en comparaison, **un nombre plutôt réduit de ruptures dans la masse**. La fragmentation s'apparente donc majoritairement à un **écaillage de surface**. Le phénomène semble en cela assez proche de ce que l'on connaît pour d'autres matériaux poreux tels que les roches ou le béton. Ce mécanisme d'écaillage est lié au phénomène de succion cryogénique : lorsque le front de gel pénètre dans une roche, l'eau non gelée est aspirée vers le front, formant alors des lentilles de glace qui provoquent le détachement de petites particules à la périphérie du bloc. D'après Letavernier et Ozouf (1987), plus l'avance du front de gel est rapide, plus l'écaillage est fine. Dans notre expérience, l'effet d'usure généré par le gonflement et les pressions répétées du sédiment sur la surface des charbons doit probablement favoriser l'intensité de son écaillage. Dans le cas des roches, le phénomène qui génère une fracturation des blocs plus en profondeur, s'explique notamment par la colonisation des microfissures du solide par la glace, laquelle agrandie en se formant les fissures et porosités préexistantes. On ne peut douter que ce mécanisme puisse être opérant dans le cas des charbons de bois, matériau macro et microporeux. Les différences de macroporosité expliquent d'ailleurs en partie (nous y reviendrons) les variations interspécifiques de la fragmentation notées au chapitre IV-II. De même, il est possible que la microporosité¹⁷ du matériau, éventuellement variable selon les taxons, puisse jouer un rôle dans l'expression de ce processus de gélifraction.

iii) à l'inverse, le **processus de météorisation** à l'œuvre à Levens génère en moyenne **moins de petits fragments** et une **fragmentation dans la masse** comparativement plus

¹⁷ Entendue ici comme regroupant les micropores et mésopores : le domaine des *micropores* concerne des cavités ne pouvant contenir que quelques unités des petites molécules de fluide, jusqu'à environ 3 nanomètres. On entre dans le domaine des *mésopores* quand leur taille est suffisante pour abriter une véritable phase liquide. Ces mésopores sont déterminants dans la capillarité du matériau (Daian, 2010).

conséquence. Cette caractéristique paraît devoir être rapprochée de l'action croisée des variations thermiques et hydriques importantes enregistrées dans cette station.

iv) le processus de fragmentation à Gavarnie semble allier les deux phénomènes précédemment évoqués, entraînant à la fois l'écaillage des surfaces et une importante fragmentation dans la masse du matériau.

v) le **piétinement de surface**, produit un **nombre moyen de fragments dans toutes les classes de taille** qui va décroissant de la classe inférieure]1-2mm] à la classe supérieure à 4mm. La fragmentation est, à bien plus faible intensité, relativement proche dans ses modalités (répartition des fragments par classe de taille) de celle produite par les essais de compression axiale, les mécanismes de fragmentation étant ici relativement similaires et se produisant par compression unidirectionnelle.

vi) tous les autres processus testés produisent moins d'effets (dans les conditions expérimentales qui les caractérisent). La fragmentation s'apparente généralement alors au détachement de petites particules et produit très peu voire pas de réelle fragmentation dans la masse du solide.

La distribution des valeurs du facteur d'augmentation du nombre de taxon (FA) montre parfois une grande dispersion, liée à la variabilité du comportement taxonomique au sein de chaque expérience. Nous l'avons vu tout au long de ce travail, toutes les espèces ne sont pas affectées de la même manière par les processus mis en œuvre.

I.2. Fragmentation par taxon

Nous présentons dans cette partie les résultats de la fragmentation selon la variable taxon, toutes expériences confondues. Les deux lots de bois utilisés au cours de ce travail sont présentés séparément.

I.2.1. Augmentation du nombre total de fragments pour les taxons issus du lot de bois A

La figure 156 présente la distribution du facteur d'augmentation du nombre total de fragments (hors fragments]0.5-1mm]) par taxon, toutes expérimentations confondues¹⁸ (hors compression mécaniques) pour le second lot de bois, celui majoritairement utilisé au cours de ce travail (appelé ici lot A).

Les distributions sont, pour tous les taxons, alignées sur le zéro ou à peine au-dessus. Cela signifie que chacun d'entre eux connaît au moins un processus par lequel il n'est pas ou très peu affecté. La distribution des valeurs est relativement ramassée et assez peu variable pour la majeure partie des taxons, hormis dans le cas de quelques exceptions notables : les deux espèces du genre *Quercus*, *Fagus*, *Corylus* et *Carpinus* présentent une distribution beaucoup plus étendue et variable, les valeurs extrêmes s'échelonnant jusqu'à un peu moins de 200. Dans une moindre mesure, *Acer*, *Pinus sylvestris*, et *Pinus sylvestris* altéré se détachent du reste des taxons par une distribution moyenne légèrement plus élevée.

¹⁸ *Quercus pubescens* étant absent des essais de météorisation et d'imbibition-dessiccation, nous avons remplacé les valeurs manquantes par la moyenne des autres taxons de manière à pouvoir intégrer les résultats ponctuels de ce taxon plus justement. La moyenne générale de cette espèce est sans doute légèrement sous-estimée, mais elle est ainsi plus juste que si nous n'avions pris en compte que les valeurs réellement existantes. Ces valeurs estimées ne peuvent être prises en compte dans les tests statistiques ; *Quercus pubescens* présente donc des effectifs réduits dans le test de Kruskal Wallis qui suit et n'est pas intégré dans la classification ascendante hiérarchique réalisée plus bas. Son comportement à la fragmentation, bien que supérieur, est toutefois assez proche de celui de *Quercus pedunculata*.

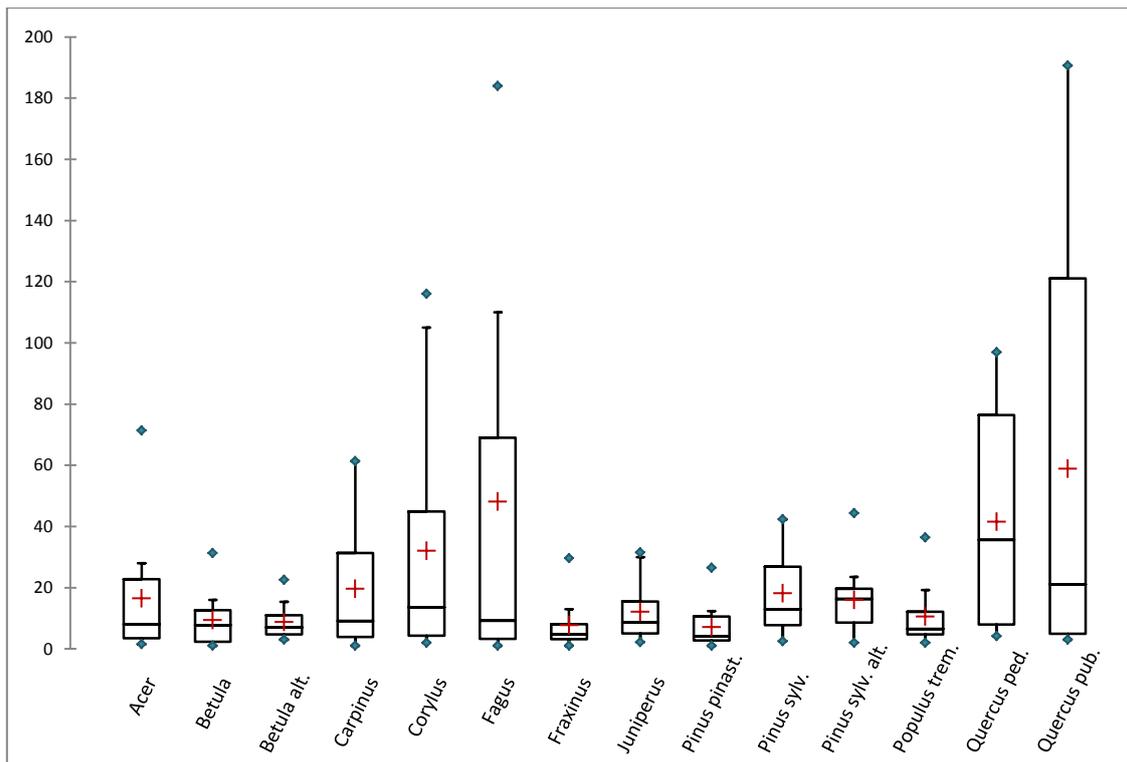


Figure 156 : Distribution du facteur d'augmentation du nombre total de fragments du lot de bois A toutes expériences confondues par taxon (les compressions mécaniques ont été exclues)

Statistique	<i>Acer</i>	<i>Betula</i>	<i>Betula alt.</i>	<i>Carpinus</i>	<i>Corylus</i>	<i>Fagus</i>	<i>Fraxinus</i>	<i>Juniperus</i>	<i>Pinus</i>	<i>pinast.</i>	<i>Pinus sylv.</i>	<i>Pinus sylv. alt.</i>	<i>Populus trem.</i>	<i>Quercus ped.</i>	<i>Quercus pub.</i>
Minimum	1.5	1.0	3.0	1.0	2.0	1.0	1.0	2.2	1.0	2.5	2.0	2.0	4.2	3.0	
Maximum	71.3	31.3	22.5	61.3	116.0	184.0	29.7	31.5	26.5	42.3	44.3	36.4	96.9	190.7	
Médiane	8.1	7.8	7.0	9.2	13.7	9.3	4.8	8.6	4.1	12.9	16.3	6.5	35.7	21.1	
Moyenne	16.5	9.4	8.7	19.6	32.0	48.1	7.7	12.1	7.0	18.2	15.9	10.5	41.5	58.8	
Écart-type (n-1)	19.9	8.6	5.8	22.1	40.2	70.3	8.4	10.0	7.2	13.4	11.3	9.8	36.3	71.3	
Coef. variation	1.2	0.9	0.6	1.1	1.2	1.4	1.0	0.8	1.0	0.7	0.7	0.9	0.8	1.2	

Tableau 37 : Statistiques descriptives du facteur d'augmentation du nombre total de fragments par taxon du lot de bois A (toutes expériences confondues, hors compressions mécaniques)

Le processus de fragmentation, vu de manière globale (toutes expériences et classes de taille de fragments confondues), semble donc relativement variable entre les taxons, quelques essences se distinguant assez largement.

I.2.2. Augmentation du nombre total de fragments des taxons issus du lot de bois B

Le second lot de bois a été utilisé seulement à Gavarnie et dans la seconde expérience de piétinement (charbons enfouis). Les résultats obtenus à partir du lot de bois B sont plus difficilement comparables car certains taxons n'étaient présents que dans une des deux expériences. De plus, le détail taxonomique par classe de taille n'est pas connu pour toutes les cellules à Gavarnie et les graphiques qui suivent sont donc fondées sur quelques valeurs seulement. Ceci contribue à accentuer certaines différences, lesquelles devront de ce fait être nuancées.

La figure 157¹⁹ laisse apparaître une distribution du nombre total de fragments relativement hétérogène entre les taxons. *Corylus* présente une fragmentation moyenne nettement supérieure aux autres essences, mais ce taxon n'était pas intégré à l'expérience de piétinement, laquelle n'a produit qu'une fragmentation anecdotique quel que soit le taxon. Les valeurs moyennes pour cette essence sont donc ici surestimées par rapport aux autres. Il n'en reste pas moins que *Corylus* produit un nombre important de fragments, se rapprochant des valeurs de *Populus alba* et *Carpinus*, plus élevées que celles des autres taxons. Inversement, *Olea* n'est présent que dans l'expérience de piétinement, ce qui explique les valeurs extrêmement faibles de ce taxon. Il n'est donc pas possible de discuter son comportement à la fragmentation.

Betula présente une fragmentation moyenne légèrement inférieure à celle de *Carpinus*. *Pinus* (regroupant dans les deux expériences le pin d'Alep et le pin maritime) et plus encore *Quercus pubescens* présentent des valeurs inférieures à celles de *Corylus*, *Populus*, *Carpinus* et *Betula*.

¹⁹ De manière à ne pas masquer l'information interspécifique qui est ici analysée, nous avons conservé l'échelle de fragmentation propre aux expériences mise en œuvre avec le lot de bois B ; elle est donc différente de celle de la figure 156, bien plus élevée. Une comparaison de la fragmentation des deux lots sera menée plus loin.

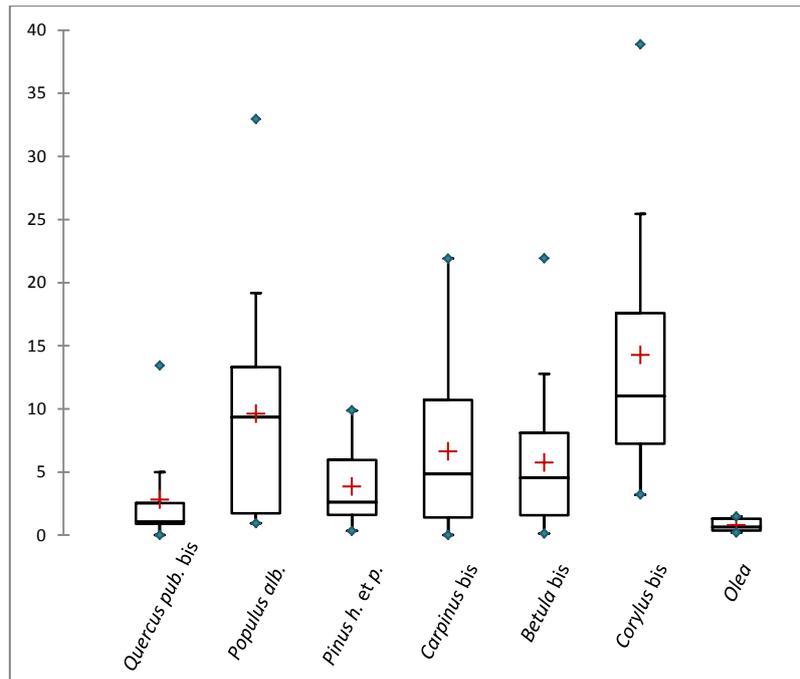


Figure 157 : Facteur d'augmentation du nombre total de fragments du lot de bois B, toutes expérience confondues, par taxon

Statistique	<i>Betula bis</i>	<i>Carpinus bis</i>	<i>Corylus bis</i>	<i>Olea</i>	<i>Pinus h. et p.</i>	<i>Populus alb.</i>	<i>Quercus pub. bis</i>
Minimum	0.0	0.9	0.3	0.0	0.1	3.2	0.2
Maximum	13.4	32.9	9.9	21.9	21.9	38.9	1.5
Médiane	1.0	9.4	2.6	4.8	4.5	11.0	0.6
Moyenne	2.8	9.6	3.8	6.6	5.7	14.3	0.8
Écart-type (n-1)	3.7	8.7	3.1	6.4	5.7	11.0	0.6
Coef. variation	1.3	0.9	0.8	0.9	1.0	0.7	0.6

Tableau 38 : Statistiques descriptives du facteur d'augmentation du nombre total de fragments par taxon pour le lot de bois B

I.2.3. Analyse des résultats

I.2.3.1. Variabilité taxonomique de la fragmentation dans le lot de bois A

Le test de Kruskal Wallis, pratiqué à partir de toutes les valeurs disponibles pour chaque taxon du lot de bois A (facteur d'augmentation du nombre total de fragments dans chaque classe de taille pour les deux échantillons de chaque taxon présents dans chaque expérimentation) indique qu'il existe des différences significatives entre les taxons (fig. 158). La procédure de comparaisons par paires (seuil de signification de Bonferroni = 0.0005) distingue les deux espèces du genre *Quercus* (*pubescens* et *pedunculata*), les plus

fragmentées, de *Pinus pinaster* et *Fraxinus excelsior*, espèces les moins fragmentées. Les autres taxons ne sont pas différenciés (fig. 159).

K (Valeur observée)	39.881
K (Valeur critique)	22.362
DDL	13
p-value (bilatérale)	0.000
alpha	0.05

Figure 158 : Tests de Kruskal Wallis fondé sur le facteur d'augmentation du nombre total de fragments dans chaque classe de taille, par échantillon et par taxon.

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes	
<i>Pinus pinast.</i>	36	6216.000	172.667	A	
<i>Fraxinus</i>	36	6746.500	187.403	A	
<i>Betula</i>	36	7678.500	213.292	A	B
<i>Betula alt.</i>	36	7883.500	218.986	A	B
<i>Populus trem.</i>	36	8428.500	234.125	A	B
<i>Juniperus</i>	36	8479.000	235.528	A	B
<i>Acer</i>	36	8790.000	244.167	A	B
<i>Carpinus</i>	36	8855.500	245.986	A	B
<i>Pinus sylv. alt.</i>	36	9059.000	251.639	A	B
<i>Fagus</i>	36	9157.000	254.361	A	B
<i>Pinus sylv.</i>	36	9485.500	263.486	A	B
<i>Corylus</i>	36	10105.000	280.694	A	B
<i>Quercus ped.</i>	36	11225.000	311.806		B
<i>Quercus pub.</i>	18	6232.000	346.222		B

Figure 159 : Comparaisons multiples par paires (procédure de Dunn, test bilatéral ; seuil de signification de Bonferroni 0.0005) fondées sur le facteur d'augmentation du nombre total de fragments de chaque classe de taille par échantillon et par taxon

I.2.3.2. Variabilité taxonomique dans le lot de bois B

Étant donné que les taxons du second lot de bois ne sont pas toujours utilisés dans les mêmes expérimentations, il est peu pertinent de tenter une comparaison statistique plus poussée de leur fragmentation. La présence trop ponctuelle d'*Olea* notamment ne permet pas d'intégrer ce taxon à notre analyse. Dans l'expérience de piétinement, la fragmentation est d'une manière générale trop réduite pour que n'apparaissent des différences significatives de comportement entre les taxons.

En revanche, nous renvoyons le lecteur aux résultats des essais de Gavarnie (Chapitre IV, § I.3.3.3.) qui avaient permis de distinguer *Corylus* et *Populus alba* de *Pinus (halepensis et pinaster)* et *Quercus pubescens*, les premiers étant significativement plus fragmentés que les seconds.

Les taxons du lot de bois B présentent donc des différences de réactions, au moins en contexte périglaciaire actuel.

À ce stade, il est donc possible de dire que les charbons de bois présentent un comportement différentiel, qui dépend à la fois du type de sollicitation subie (et de sa mise en œuvre expérimentale) et de la variable taxon. Il est en revanche difficile pour le moment de comparer la fragmentation des deux lots de bois pour les raisons déjà mentionnées. Il importe donc de hiérarchiser les effets de ces trois facteurs de manière à évaluer le poids de la variabilité interspécifique et son incidence sur la représentativité des assemblages anthracologiques.

I.3. Interaction des effets « processus », « taxon » et « lot » sur la fragmentation des charbons de bois

Le tableau 39 indique le facteur d'augmentation du nombre total de fragments (FA) par expérimentation, par taxon et par lot de bois. Les plages de couleurs correspondent à l'échelle des valeurs, du plus clair (FA faible) au plus foncé (FA élevé). De 0 à 15, le FA est considéré comme faible, de 15 à 75 il est moyen, et élevé au-delà de 75 (les intervalles sont déterminés en fonction des minima et maxima de la série – de 0 à 182.3 – et des résultats des classifications ascendantes hiérarchiques réalisées à l'issue de chaque expérience).

La variabilité entre expérience mise en évidence plus haut apparaît d'emblée : certaines présentent de nombreuses valeurs moyennes et hautes quand d'autres ne fournissent que des valeurs faibles.

La variabilité entre les lots est difficile à apprécier même si l'on note qu'aucune valeur haute n'est représentée pour le second lot de bois. Cela doit à l'évidence être nuancé dans la mesure où le détail par taxon pour les essais de Gavarnie n'est connu que pour les cellules enterrées 2008 et 2010 (dans les autres cellules seules la fraction >4mm est quantifiée) ; or,

nous l'avons vu, la fragmentation moyenne – tous taxons confondus – est très importante dans les dépôts de surface).

Enfin, aucune réelle constante par taxon n'est mise en évidence : aucun taxon ne présente des valeurs toujours hautes ou toujours faibles. En revanche, les taxons qui présentent des valeurs élevées sont souvent identiques au sein de plusieurs expériences. De même, si certaines expériences (Météo Valbonne, Imbibition-dessiccation, etc.) ont produit peu d'effets sur la totalité des taxons, on note dans les cas des expériences qui ont généré une plus grande fragmentation du matériel (Météo Levens, gel-dégel, etc.) que le comportement des taxons est variable : aucune expérience ne produit que des valeurs élevées.

Lot	Taxons	Météo Levens	Météo Valbonne	Imbibition- Dessiccation	gel-dégel	piétinement 1	retrait- gonflement	Gavarnie enterré 2008	Gavarnie enterré 2010	Piétinement 2 fin	Piétinement 2 grossier
A	<i>Acer</i>	19.3	3.3	2.5	46.5	22.7	4.6	-	-	-	-
A	<i>Betula</i>	10.3	2.0	1.5	21.7	13.4	7.6	-	-	-	-
A	<i>Betula alt.</i>	4.3	4.5	4.5	10.2	15.8	13.0	-	-	-	-
A	<i>Carpinus</i>	42.0	4.3	1.0	52.0	13.1	5.5	-	-	-	-
A	<i>Corylus</i>	73.5	7.5	3.0	84.8	19.5	3.9	-	-	-	-
A	<i>Fagus</i>	182.3	10.0	1.5	82.7	8.9	3.0	-	-	-	-
A	<i>Fraxinus</i>	4.8	2.8	3.0	21.3	11.7	2.8	-	-	-	-
A	<i>Juniperus</i>	22.3	5.3	5.0	24.0	13.2	2.9	-	-	-	-
A	<i>Pinus pinast.</i>	7.3	1.8	2.0	7.0	16.0	8.3	-	-	-	-
A	<i>Pinus sylv.</i>	15.5	4.8	7.0	35.3	33.7	12.9	-	-	-	-
A	<i>Pinus sylv. alt.</i>	16.3	10.8	10.5	18.7	31.1	8.2	-	-	-	-
A	<i>Populus trem.</i>	4.8	12.3	3.5	7.7	27.8	7.1	-	-	-	-
A	<i>Quercus ped.</i>	77.3	12.5	7.0	59.2	88.4	4.6	-	-	-	-
A	<i>Quercus pub.</i>	-	-	-	178.7	123.4	3.9	-	-	-	-
B	<i>Betula</i>	-	-	-	-	-	-	13.8	22.7	2.27	4.27
B	<i>Carpinus</i>	-	-	-	-	-	-	13.9	34.7	2.4	3.33
B	<i>Corylus</i>	-	-	-	-	-	-	16.2	57.1	-	-
B	<i>Pinus p. et h.</i>	-	-	-	-	-	-	12.1	8.3	3.5	3.58
B	<i>Populus alba</i>	-	-	-	-	-	-	38.9	50.7	4	4.07
B	<i>Quercus pub.</i>	-	-	-	-	-	-	3.1	4.1	1.93	2.67
B	<i>Olea</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	2.13	2.6

Tableau 39 : Facteur d'augmentation du nombre de fragments (FA) par expérimentation, par lot et par taxon. L'échelle des gris correspond à l'augmentation de FA (+ clair = faible / + foncé = élevé)

À première vue, les deux facteurs « taxon » et « expérimentation » semblent participer de la variation de la fragmentation.

La classification ascendante hiérarchique²⁰ (fig. 160) pratiquée à partir des valeurs moyennes du nombre total de fragments produits par expérimentation pour chaque taxon²¹ permet de mieux visualiser l'interaction « taxon/expérimentation » et fait apparaître une structuration des données qui met en évidence la façon dont agit le facteur « taxon » sur la fragmentation. Cinq groupes (fig. 161) d'essences dont le fonctionnement diffère en fonction des processus à l'œuvre (fig. 162) sont mis en évidence :

La plus grande inertie concerne *Quercus pedunculata* (groupe 5) qui s'individualise par rapport aux autres taxons, de même que *Fagus* (groupe 3). Le groupe 4 est constitué par *Pinus sylvestris*, *Pinus sylvestris* altéré et *Populus*. Le groupe 1 est composé par *Acer*, *Carpinus* et *Corylus*. Enfin le groupe 2, le moins affecté par l'ensemble des processus, rassemble tous les autres taxons (*Betula*, *Betula* altéré, *Fraxinus*, *Juniperus* et *Pinus pinaster*).

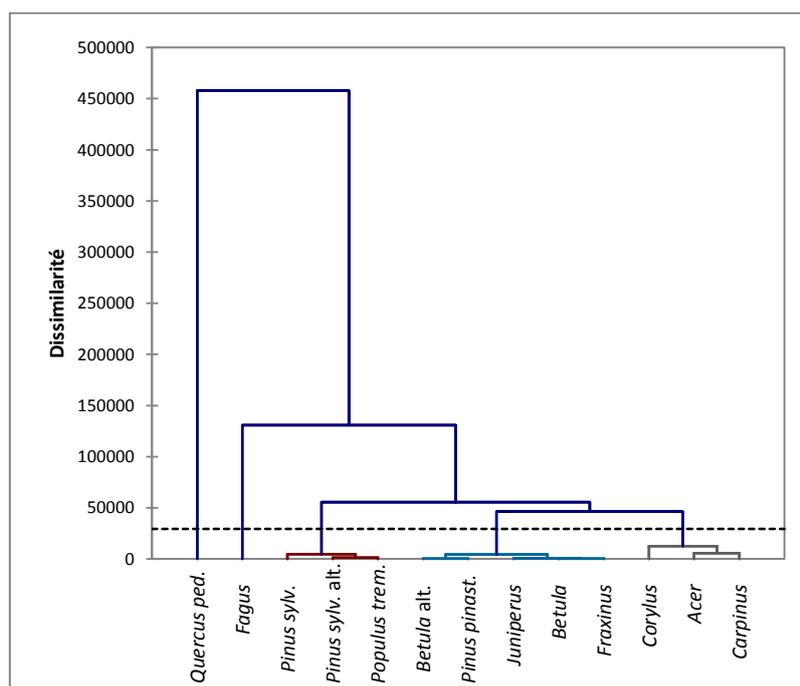


Figure 160 : Classification ascendante hiérarchique (distances euclidiennes, méthode de Ward) des taxons en fonction du facteur d'augmentation du nombre total de fragments par expérimentation

²⁰ Inertie intra-classe : 6.43 % / inertie inter-classes : 93.57 %

²¹ *Quercus pubescens*, dont les effectifs diffèrent des autres essences, n'est pas intégré à l'analyse (cf. note 17).

Classe	1	2	3	4	5
Objets	3	5	1	3	1
Somme des poids	3	5	1	3	1
Variance intra-classe	9261.417	1556.825	0.000	3084.667	0.000
Distance minimale au barycentre	60.387	16.482	0.000	12.740	0.000
Distance moyenne au barycentre	77.482	34.090	0.000	40.767	0.000
Distance maximale au barycentre	92.124	42.241	0.000	56.402	0.000
	<i>Acer</i>	<i>Betula</i>	<i>Fagus</i>	<i>Pinus sylv.</i>	<i>Quercus ped.</i>
	<i>Carpinus</i>	<i>Betula alt.</i>		<i>Pinus sylv. alt.</i>	
	<i>Corylus</i>	<i>Fraxinus</i>		<i>Populus trem.</i>	
		<i>Juniperus</i>			
		<i>Pinus pinast.</i>			

Figure 161 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique

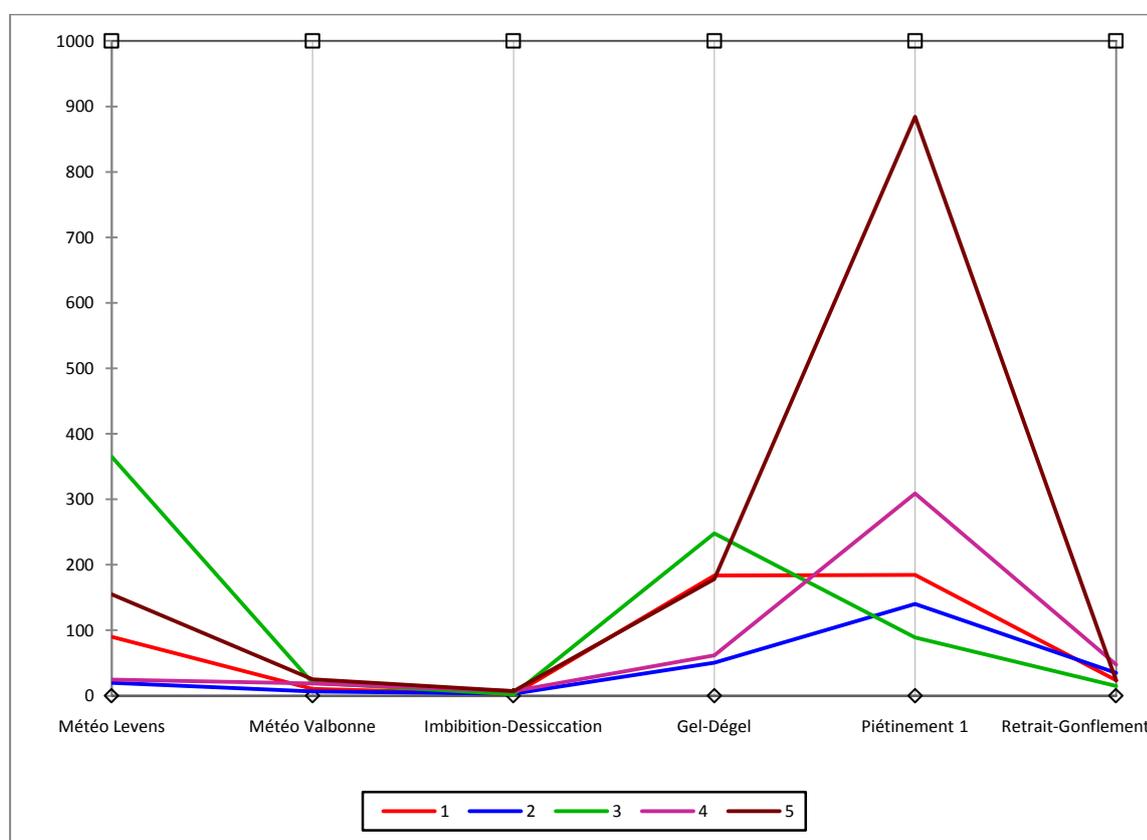


Figure 162 : Profil des groupes

- *Quercus pedunculata* (groupe 5) se distingue de manière notable par les valeurs extrêmement élevées atteintes à l'issue de l'essai de piétinement. Il présente également des valeurs relativement hautes dans l'expérience d'alternances de gel-dégel, à Levens, ainsi qu'à Valbonne comparativement aux autres groupes. Il est en

revanche plutôt moins affecté que les autres taxons par l'expérience de retrait-gonflement du sédiment.

- C'est également le cas de *Fagus* (groupe 3), qui présente par contre les valeurs les plus basses dans l'expérience de piétinement, mais les plus hautes dans l'essai de gel-dégel comme à l'issue du processus de météorisation à Levens ; les valeurs de Valbonne sont également parmi les plus élevées relativement aux autres groupes.
- Le groupe 4 (*Pinus sylvestris*, *Pinus sylvestris* altéré et *Populus*) est en moyenne moins affecté que *Quercus* par le piétinement, mais plus que tous les autres groupes. Il présente aussi les valeurs les plus hautes dans les essais de retrait-gonflement. Sa fragmentation moyenne est relativement tenue dans les autres essais.
- Le groupe 2 est caractérisé par des valeurs relativement faibles quel que soit le processus à l'œuvre. Elles sont toutefois supérieures à celles de *Fagus* dans l'expérience de piétinement et à peine inférieures à celles du groupe 4 dans l'essai de retrait-gonflement.
- Enfin les espèces du groupe 1 (*Acer*, *Carpinus* et *Corylus*) se caractérisent par une fragmentation moyenne dans toutes les expérimentations.

(L'expérience d'imbibition-dessiccation, nous l'avons vu, produit peu d'effet et les groupes sont peu hétérogènes au regard de cette expérience).

Un certain nombre d'observations peuvent être faites quant aux regroupements spécifiques opérés par la CAH :

- *Quercus* et *Fagus* se caractérisent par des traits anatomiques bien particuliers qui les différencient des autres taxons :

Quercus possède la zone poreuse de loin la plus marquée et des rayons multisériés plus longs et larges que ceux de tous les autres taxons. *Fagus* présente quant à lui une zone poreuse moins marquée, mais souvent bien visible et de très nombreux vaisseaux assez larges dont la disposition (et c'est le cas de nos échantillons) est généralement très diffuse. Ses rayons, moins longs et larges que ceux de *Quercus*, sont cependant de dimensions bien supérieures à ceux des autres taxons. Or, si *Quercus* et *Fagus* montrent le moins d'affinités anatomiques avec les autres taxons, ce sont aussi les essences dont le comportement à la

fragmentation est le plus éloigné de celui du reste des essences testées. Ces deux taxons constituent chacun un groupe à part entière, individualisé par la classification ascendante hiérarchique.

- *Acer*, *Carpinus* et *Corylus* sont regroupés par la classification. Or, ces taxons possèdent un certain nombre de caractéristiques anatomiques en commun. *Carpinus betulus* et *Corylus avellana* appartiennent tous deux à la famille des *Betulaceae* et sont extrêmement proches anatomiquement ; ils présentent un agencement des vaisseaux accolés en petits groupes ou en longues files radiales, des rayons relativement longs, uni et jusqu'à tri ou quadrisériés dans les faux-rayons ligneux.

Acer pseudoplatanus, moins proche anatomiquement, possède également des vaisseaux dont la disposition est diffuse, généralement isolés ou accolés en courtes files radiales (de deux à quatre vaisseaux, rarement six). Ses rayons sont longs et relativement larges par rapport au reste des taxons (unisériés et multisériés de deux à cinq, et jusqu'à sept cellules). Les trois taxons ont par ailleurs en commun de posséder des vaisseaux avec des épaississements spiralés plus ou moins marqués, ce qui les différencie de toutes les autres essences testées.

- *Pinus sylvestris* sain et altéré sont regroupés avec *Populus tremula*. Il est plus difficile de parler ici d'affinités anatomiques étant donné que nous sommes en présence de taxons homoxylés et hétéroxylés. Toutefois, ces taxons se rapprochent du fait de leur relative porosité (entendue ici au sens de l'importance des espaces vides ; *Populus* étant alors l'espèce la plus poreuse) et de leur masse volumique faible. De même, les parois des cellules axiales de ces taxons sont particulièrement minces tant chez *Populus tremula* que chez *Pinus sylvestris* (au moins dans le bois initial). Ces caractéristiques expliquent probablement en partie que ces taxons se détachent de ceux composant le groupe 2, le moins fragmenté.

- Le regroupement de ces derniers taxons est en revanche difficile à expliquer. Le groupe 2 se compose d'espèces homoxylées, à pores diffus ou à zone poreuse et dont l'indice de porosité (différence bois initial/bois final) est donc variable. Leur masse volumique est parfois très basse (*Betula* altéré), moyenne (*Pinus pinaster*, *Juniperus*, *Betula*)

ou haute (*Fraxinus*). Leur porosité globale (importance des vides) est également variable ; elle est faible dans le cas de *Pinus pinaster* et *Fraxinus* et plus élevée dans le cas de *Juniperus*, *Betula* et *Betula* altéré. Leurs rayons sont en revanche globalement fins et très courts à courts.

Ces résultats paraissent confirmer, ainsi que nous l'avons mis en évidence au chapitre III, **l'incidence et l'interaction des propriétés physiques et anatomiques des taxons sur leur fragmentation**. La variation de ces propriétés explique également en partie le comportement différentiel d'un même taxon lorsqu'il est soumis à des processus différents. Comme nous l'avons vu au cours de notre travail, certaines propriétés (telles la masse volumique par exemple) favorisent tantôt la fragmentation ou, au contraire, l'intégrité des charbons de bois.

Dans certains cas (groupe 2 par exemple), les propriétés physiques et anatomiques ne suffisent pas à expliquer les variations de fragmentation des taxons, indiquant par là que **d'autres critères qui restent à définir** peuvent intervenir, ainsi probablement qu'**une part d'aléa** difficile à mesurer.

Les résultats de l'analyse de variance (ANOVA, fig. 163) fondées sur les valeurs du tableau 39 indiquent que **les variables « taxon » et « expérimentation » sont incidentes** (p-value inférieure au seuil alpha) sur la fragmentation. Elles expliquent à elles deux 46.6% de la variation de la série (R^2). La valeur de F est cependant plus élevée pour **le facteur « expérimentation » qui explique une plus grande part de la variation du modèle**.

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Taxon	16	20447.682	1277.980	1.832	0.041
Expérimentation	9	28522.749	3169.194	4.543	< 0.0001

Figure 163 : Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la fragmentation en fonction des facteurs « taxon » et « expérimentation »

Le test inclut les valeurs des deux lots de bois considérés conjointement. Le faible poids de la variable « taxon » s'explique notamment par la présence d'essences qui, communes aux deux lots, montrent un comportement différentiel d'un lot à l'autre, le poids de la variable « expérimentation » en est donc renforcé. Malheureusement, les différences de conditions

expérimentales, d'effectifs et le fait que certains taxons ne soient présents que dans un des lots rendent hasardeuse la réalisation de tests statistiques qui permettraient de quantifier le poids de la variable « lot ». La question de la variabilité intra-spécifique et intra-genre sera néanmoins discutée dans la deuxième partie de ce chapitre.

Pour l'heure, nous avons pu mettre en évidence une réponse différentielle des charbons de bois en fonction de la sollicitation à laquelle ils sont soumis, laquelle est accentuée ou au contraire minimisée selon le taxon d'origine. Il existe donc une variabilité inter-spécifique de la fragmentation, qui, pour être traitée pleinement, doit inclure une analyse des modalités de la fragmentation des taxons, soit la répartition des fragments au sein des différentes classes de taille.

I.4. L'échelle du fragment

I.4.1. Variabilité de la fragmentation des taxons par classe de taille

Nous l'avons vu, même si la variable « expérimentation » est incidente, nos résultats, qu'ils soient considérés de manière globale ou en isolant chacun des processus testés, mettent en évidence une certaine variabilité de la réaction des taxons. Au cours de notre travail, lorsque les données le permettaient, une analyse statistique de la fragmentation dans chaque classe de taille a été menée. Or, tant à l'issue des tests de compression mécanique (Chapitre III, § II.2.3.2.) qu'à Gavarnie (Chapitre IV, § I.3.3.4), la variabilité interspécifique est moins prononcée, voire absente, dans la classe de taille supérieure à 4mm. Ainsi, selon la taille des fragments analysés, les risques de sous ou surreprésentations seraient plus ou moins accentués. Les modalités de la fragmentation des taxons, leurs similitudes et singularités, sont donc des aspects qui, parce qu'ils touchent de près la question de la représentativité paléoenvironnementale de l'anthraco-analyse, méritent que l'on s'y attarde quelques instants.

I.4.1.1. Répartition des fragments par classe de taille dans le lot de bois A

En termes de proportions (fig. 164), il apparaît nettement que tous les taxons produisent plus de petits fragments que de gros. La classe]1-2mm] est la plus représentée, oscillant entre 63% et 80% du nombre total de fragments produits pour chacun des taxons. La représentation des classes supérieures est relativement homogène : de 11 à 21 % des fragments sont contenus selon les taxons dans la seconde classe (]2-4mm]) et de 7 à 24 % des fragments sont supérieurs à 4mm. Sur le plan taxonomique, les essences les plus fragmentées, sont celles qui montrent le plus fort taux de fragments dans la classe inférieure. La plupart dépassent 70% (*Corylus*, *Fagus*, *Pinus sylvestris*), voire 80% dans le cas de *Quercus pubescens* et *Quercus pedunculata*. Inversement, les taxons les moins fragmentés sont ceux qui présentent relativement aux autres la plus grande proportion de fragments dans la classe >4mm (plus de 20% pour *Betula*, *Fraxinus*, *Juniperus*).

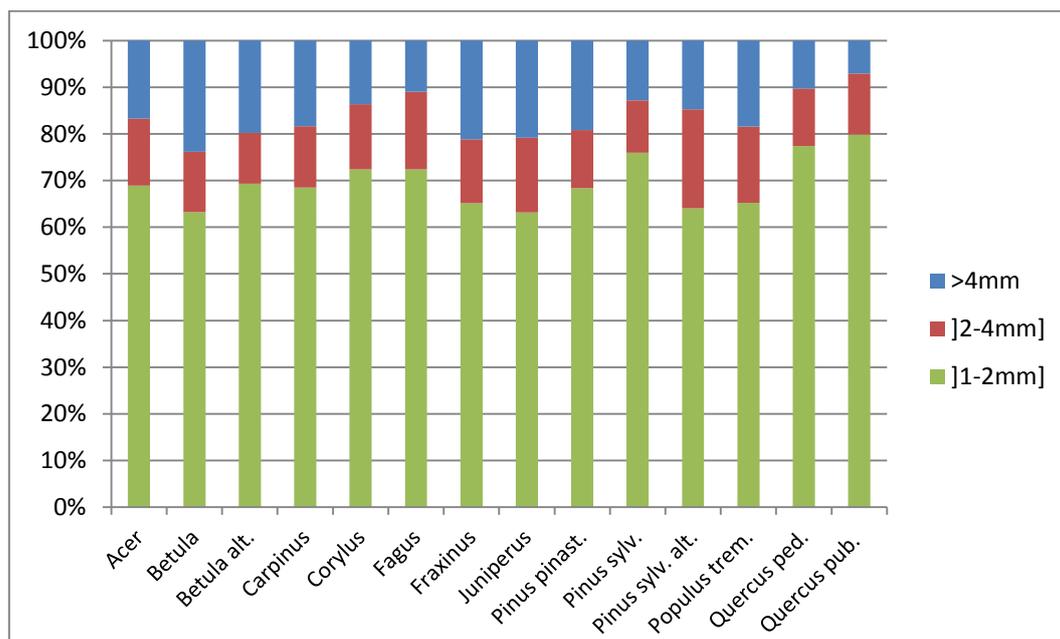


Figure 164 : Proportion moyenne des fragments dans chaque classe de taille par taxon du lot de bois A

Ceci ne signifie pas pour autant que le nombre de fragments >4mm de ces essences soient plus élevé que celui des autres taxons. En termes de nombre de fragments, les essences les plus fragmentées sont celles qui présentent le plus grand nombre de fragments dans toutes les classes de taille ainsi qu'on peut le voir sur le graphique suivant qui figure le détail de la

répartition des fragments (en nombre) au sein de chaque classe de taille : [1-2mm], [2-4mm], >4mm (fig. 165). Les intervalles correspondent à l'erreur standard.

La fragmentation produit pour tous les taxons un nombre important de petits fragments et un nombre plus réduit de moyens et de gros fragments.

Le nombre moyen de fragments dans les deux classes de taille supérieures ([2-4mm], >4mm) est à peu près équivalent, la distribution des deux séries se recoupe pour tous les taxons. La variabilité interspécifique au sein de ces deux classes paraît assez réduite. Les espèces qui présentaient un nombre total de fragments plus élevé (*Quercus pedunculata*, *Quercus pubescens*, *Fagus*, *Corylus*, *Carpinus* ; cf. fig. 152), montrent dans ces deux classes une distribution moyenne légèrement supérieure à celles des autres taxons, mais les différences sont assez ténues. En revanche, dans la classe de taille inférieure ([1-2mm]), beaucoup mieux représentée, les différences taxonomiques apparaissent de façon bien plus marquée. On retrouve alors les distinctions précédemment mises en évidence entre les taxons peu fragmentés, moyennement fragmentés et très fragmentés.

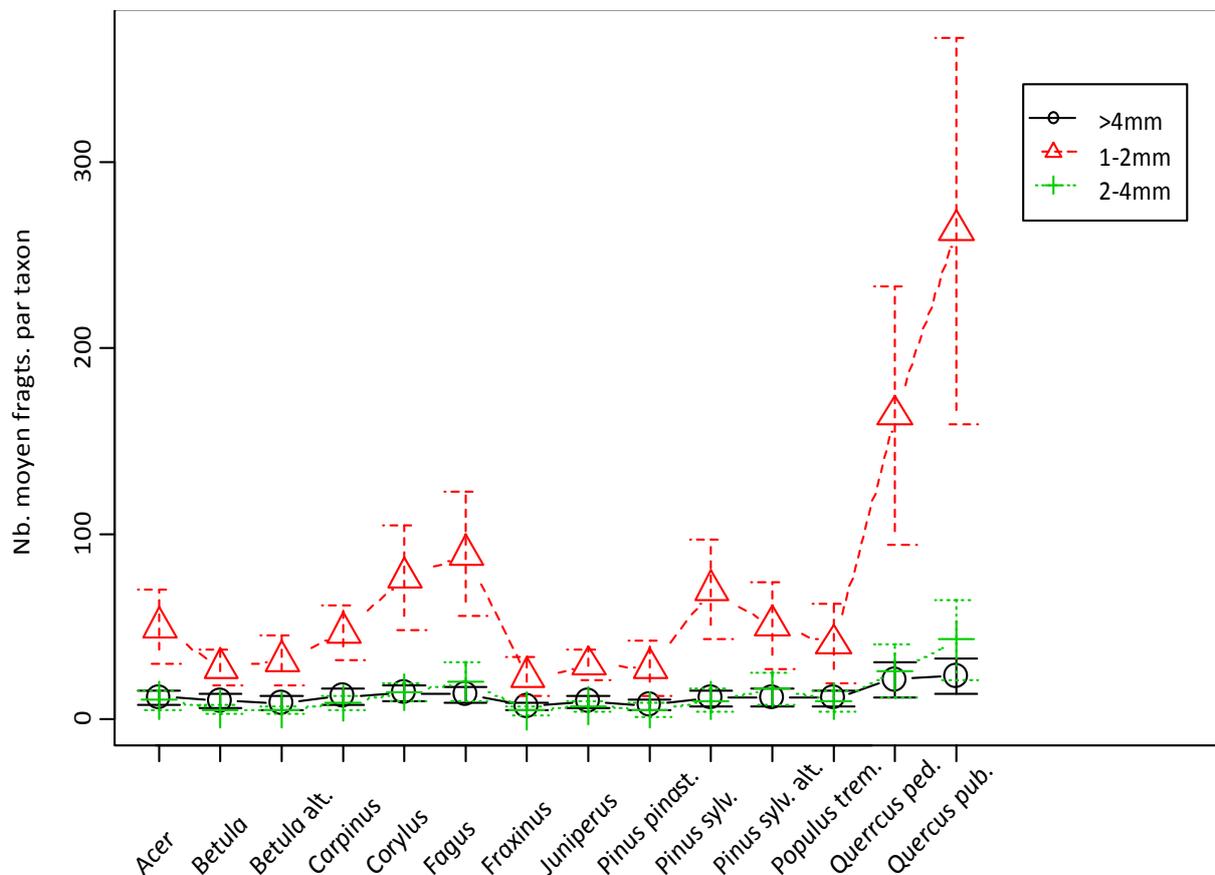


Figure 165 : Nombre moyen de fragments par classe de taille et par taxon du lot de bois A (les intervalles correspondent à l'erreur standard)

I.4.1.2. Répartition des fragments par classe de taille dans le lot de bois B

Pour le lot de bois B, nous ne disposons que de quelques valeurs nous permettant d'analyser le détail taxonomique de la répartition par classe des fragments. De plus, ces valeurs sont issues de processus ayant produit une fragmentation réduite (cellules enterrées 2008 et 2010 de Gavarnie), voire quasi inexistante (piétinement du matériel enfoui) et certains taxons ne sont présents que dans l'une des expérimentations. Les différences de fragmentation entre taxons sont donc d'autant plus marquées.

En termes de proportions, la répartition par classe est quelque peu différente de ce que nous avons observé précédemment (fig. 166).

Olea, qui n'est présent que dans l'expérience de piétinement et qui n'est quasiment pas fragmenté, compte seulement un peu plus de 10% de fragments dans la classe]1-2mm], cette classe atteignant autour de 65% dans le cas de *Corylus* et les autres taxons s'échelonnant entre 36 et 52% environ. La classe]2-4mm] comprend entre 20 et 26% des fragments pour tous les taxons, tandis que la classe >4mm compte de 14 à 62% des fragments. Les différences de fragmentation étant ici plus prononcées que dans le premier lot de bois, elles sont plus perceptibles du point de vue de la répartition des fragments entre les classes : la proportion de petits fragments est importante pour les taxons très fragmentés et inversement, la proportion de gros fragments est supérieure dans le cas des taxons les moins fragmentés.

Il semble donc que la proportion de fragments contenue dans chaque classe de taille puisse être servir d'indicateur du niveau de fragmentation d'un taxon.

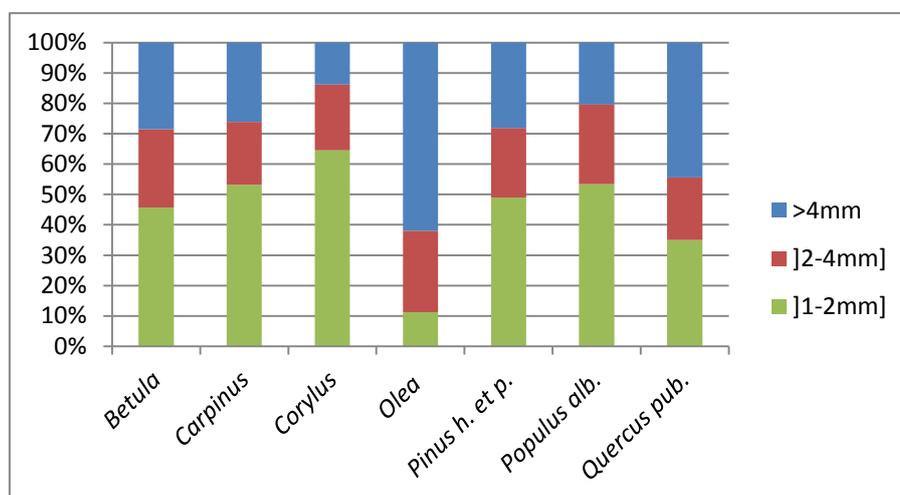


Figure 166 : Proportion moyenne des fragments dans chaque classe de taille par taxon du lot de bois B

En termes de nombre de fragments, la distribution par classe de taille (fig. 167) montre, comme dans le lot A, un recouplement des valeurs moyennes pour les deux classes supérieures ([2-4mm], >4mm), lesquelles sont toutefois plus variables sur le plan spécifique. Une partie de cette variabilité est imputable aux caractéristiques de la série évoquées précédemment : *Olea* n'est présent que dans l'expérience de piétinement (qui a produit une très faible fragmentation) et il est donc sous-représenté par rapport aux autres taxons, tandis que *Corylus* n'est présent qu'à Gavarnie (l'expérience a produit une fragmentation plus importante en particulier dans le cas de *Corylus*) et il est donc surreprésenté. Les différences taxonomiques sont à nouveau davantage perceptibles dans la classe [1-2mm].

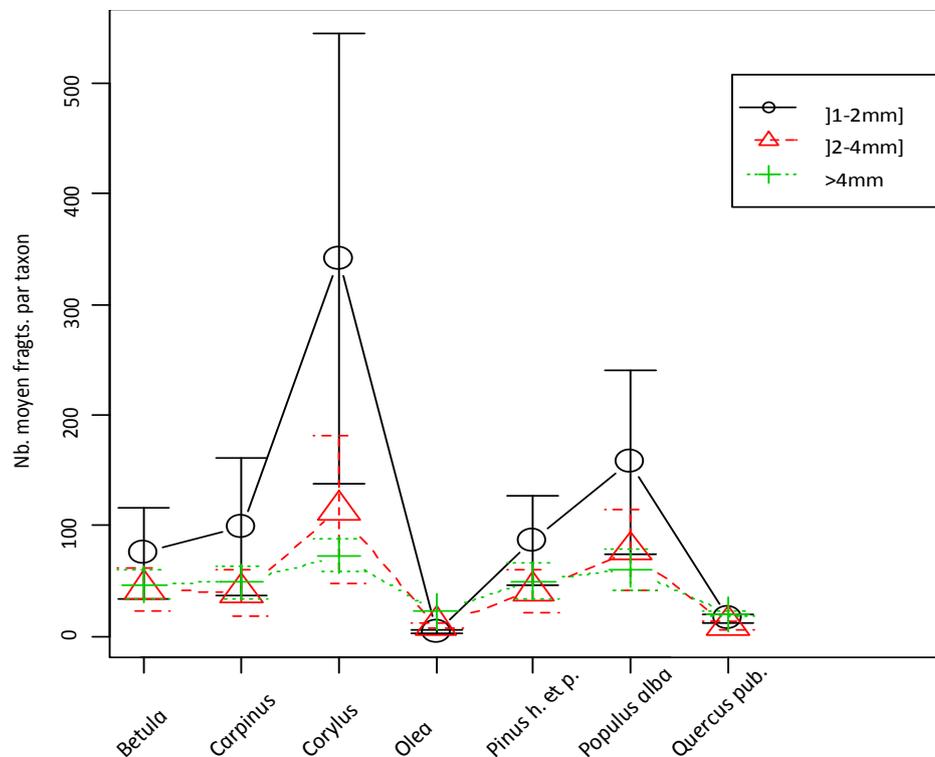


Figure 167 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille pour les taxons du lot de bois B (incluant, les cellules enfouies 2008 et 2010 de Gavarnie et l'expérimentation de piétinement de Castanet)

En définitive, quel que soit le lot de bois considéré, et quel que soit le niveau de fragmentation des taxons, la variabilité taxonomique semble toujours plus importante lorsque l'on considère les petits fragments. Parce que la classe inférieure est la plus nombreuse, c'est là que, lorsque des différences existent entre taxons, elles peuvent atteindre des niveaux importants. Les différences de représentation des taxons paraissent moins importantes dans les classes de taille supérieures et en particulier dans la classe

>4mm. **Cela suggère que les sur- et sous-représentations potentielles des taxons sont atténuées lorsque l'anthraco-analyse porte sur les fragments >4mm.**

I.4.2. Significativité des différences de fragmentation et biais d'interprétation

Sur le plan statistique, les différences de fragmentation entre taxons sont faiblement significatives puisque seulement quelques paires de taxons se distinguent dans les deux lots de bois. La majeure partie des essences appartient à une seule population statistique du point de vue de leur fragmentation (ce chapitre, § I.2.3.). Il est toutefois nécessaire de s'interroger sur l'incidence des différences de fragmentation observées sur la représentativité quantitative de l'anthraco-analyse. En d'autres termes, **les différences de fragmentation observées sur le plan taxonomiques sont-elles à même de produire des biais de représentation des taxons et dans quelle mesure influent-ils sur l'analyse quantitative et les interprétations paléoenvironnementales qui en découlent ?**

Comme dans une anthraco-analyse classique, nous avons calculé les fréquences relatives des taxons au sein de chaque lot à partir des valeurs moyennes du nombre fragments produits à l'issue de la phase d'expérimentation. Les diagrammes qui suivent présentent les fréquences relatives des taxons à l'intérieur de chacune des classes de taille de fragments afin d'évaluer dans quelle classe la représentation des essences est la moins « faussée » par la variabilité taxonomique du processus de fragmentation.

Avant expérimentation, le nombre de fragments est identique pour tous les taxons ; chaque essence vaut donc 1, soit 7.14% pour chaque taxon dans le lot A et 20% dans le lot B (nous excluons ici *Olea* et *Corylus* qui n'ont pas subi l'intégralité des processus expérimentaux du lot B). À l'issue des expériences, la représentation des taxons dans le lot de bois A oscille entre 26.6% et 2.3% dans la classe]1-2mm], entre 22.7% et 2.6% dans la classe]2-4mm], et entre 13.2% et 4.2% dans la classe >4mm. *Quercus pubescens* et *Fraxinus* sont toujours les espèces respectivement les plus et moins représentées quelle que soit la classe de taille considérée (fig. 168 haut).

Ainsi, d'un rapport de 1 à 1 d'une espèce à l'autre avant fragmentation, on passe à un rapport de 1 à 12 dans la classe]1-2mm], de 1 à 9 dans la classe]2-4mm] et de 1 à 3 dans la

classe >4mm entre l'espèce la moins représentée et l'espèce la plus représentée. Les différences de fragmentations influent donc moins sur la représentation quantitative des taxons dans la classe >4mm.

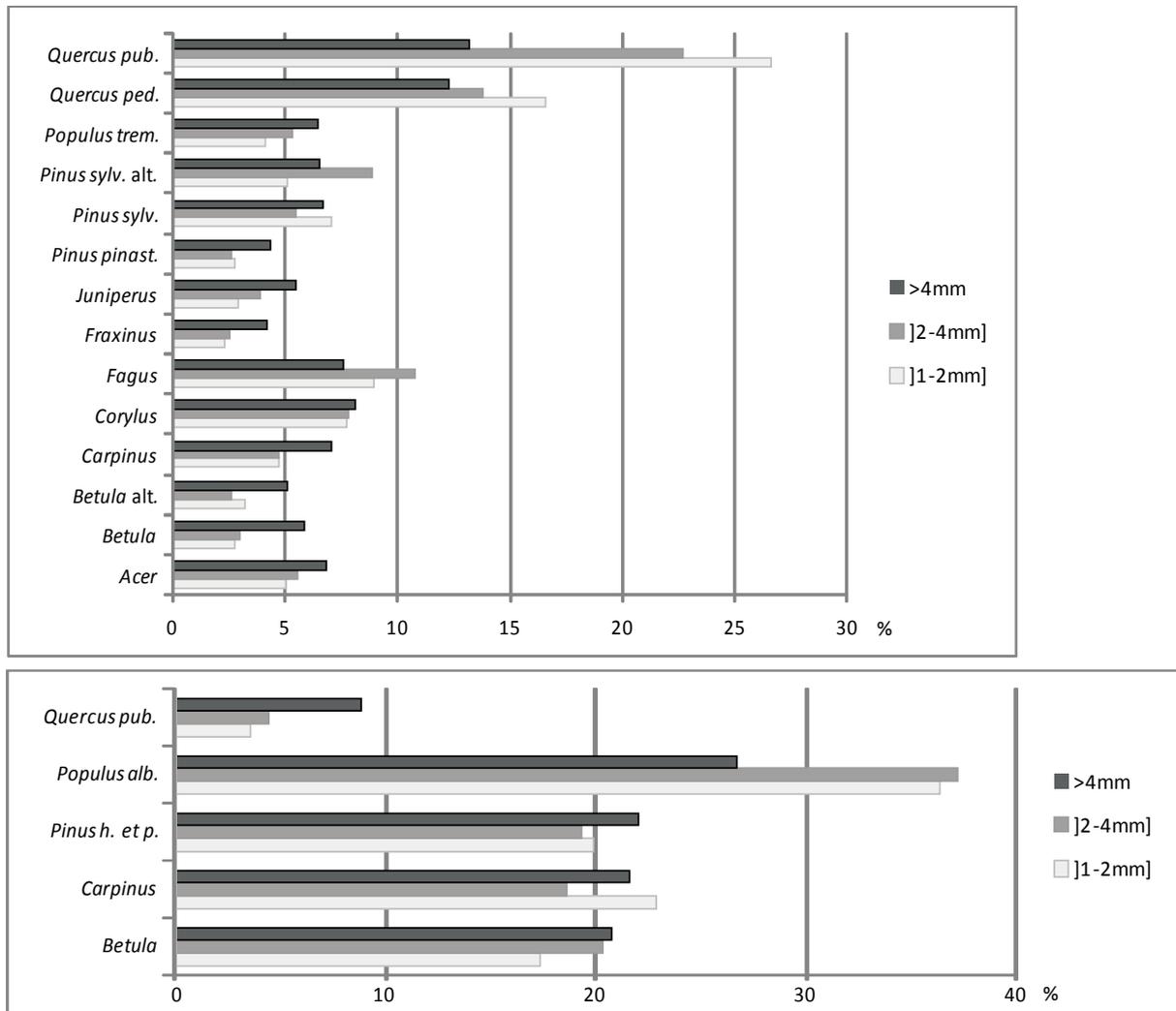


Figure 168 : Fréquences relatives des taxons du lot de bois A (en haut) et B (en bas) dans chaque classe de taille après fragmentation (calculées à partir du nombre moyen de fragments par classe de taille toutes expériences confondues). La représentation des essences varie dans les différentes classes de taille.

Dans le lot de bois B (fig. 168 bas), les fréquences relatives maximales et minimales des taxons oscillent entre 36.3% et 3.6% dans la classe]1-2mm], entre 37.2% et 4.5% dans la classe]2-4mm] et 26.7% et 8.9% dans la classe >4mm. Les espèces concernées sont à nouveau identiques dans toutes les classes de taille : *Populus tremula* est l'espèce la mieux représentée (la plus fragmentée) et *Quercus pubescens* la moins représentée (la moins fragmentée).

Le rapport entre l'espèce la plus représentée et la moins représentée est ici de 3 dans la classe >4mm, de 8.4 dans la classe]2-4mm] et de 10 dans la classe]1-2mm]. Les différences de représentation des taxons sont donc à nouveau nettement plus importantes dans la classe de taille [1-2mm] et atténuées dans la classe >4mm.

Dans l'un comme dans l'autre des lots, la **marge d'erreur** maximale induite par la fragmentation²² **oscille entre 15 et 20% dans les classes]1-2mm] et]2-4mm]**, alors qu'elle est **inférieure à 10% dans la classe >4mm**.

Les sur- et sous-représentations des taxons liées à la fragmentation post-dépositionnelle sont donc moins prononcées dans la classe de taille supérieure. Il faut également noter que les **marges d'erreurs** induites sont **relativement faibles** ; elles ne sont **pas de nature à modifier en profondeur les interprétations paléoenvironnementales**. En termes de dynamique de végétation, certains processus risquent de se voir accentués ou atténués mais sûrement pas masqués ou inversés.

Par ailleurs, même si les marges d'erreurs paraissent plus importantes dans les classes de tailles inférieures, **l'ordre et l'échelle de représentation des taxons ne sont pas modifiés d'une classe à l'autre**. Les taxons les plus fragmentés (et donc les plus représentés) le sont dans toutes les classes et inversement. Ceci confirme les observations archéologiques faites par plusieurs chercheurs, qui ont montré que les dynamiques de végétation enregistrées par les charbons de bois ne varient pas en fonction de la taille des fragments analysés (notamment Badal-Garcia, 1990 ; Chabal, 1991 ; Henri, 2011).

²² La marge d'erreur est entendue ici comme la différence vis-à-vis de la représentation réelle des taxons ante-fragmentation, où chaque taxon vaut 1 (soit 7.14% par taxon dans le lot A et 20% dans le lot B).

II. SYNTHÈSE GÉNÉRALE ET DISCUSSION

II.1. Impact des différentes sollicitations sur les charbons de bois

Nous l'avons vu tout au long de ce travail, l'impact le plus évident des différentes sollicitations auxquelles les charbons de bois ont été soumis concerne la fragmentation du matériau. Ainsi que nous l'avons montré au point I de ce chapitre, celle-ci est d'intensité variable selon le processus mis en œuvre et les caractéristiques du protocole. Au vu de nos résultats, les processus mettant en jeu des pressions mécaniques, des phénomènes d'usure et associant plusieurs facteurs d'altération sont les plus dommageables pour les charbons de bois. Les processus météoriques et périglaciaires paraissent en ce sens particulièrement destructeurs, tant pour les accumulations elles-mêmes (le dépôt) que pour les charbons qu'elles contiennent.

Au-delà du processus de fragmentation, certains « effets secondaires » sont à noter.

Notre travail a mis en évidence la **sensibilité des charbons de bois aux sollicitations produites par les contractions et gonflements du sédiment** encaissant générés expérimentalement par modification des conditions thermiques et hydriques du milieu. Les forces qui s'exercent génèrent une **rupture mécanique du matériau** (points II des chapitres IV et V). Les tests de retrait-gonflement du sédiment, générés par simple variation de la teneur en eau, paraissent moins destructeurs que les alternances de gel-dégel, mais la phase de compression est réduite dans notre protocole comme le nombre de cycles, et nos résultats permettent cependant d'envisager que ce type de phénomène puisse aboutir à une fragmentation conséquente en contexte naturel. Il est à noter que les taxons les plus endommagés par les forces de traction, majoritairement à l'œuvre dans notre essai, sont les moins denses (chapitre V, point II), contrairement à ce qui est observé lorsque les forces de compression sont la contrainte principale (chapitre III ; chapitre IV, point II). Les processus mettant en œuvre des contraintes de traction et de compression doivent donc endommager les taxons denses comme ceux de faible densité.

En **contexte périglaciaire** actuel (point I du chapitre IV), les alternances de gel-dégel ont également généré un **phénomène de circulation verticale des charbons de bois** ; les plus gros fragments de charbon sont remontés à la surface par **cryoexpulsion**.

Lorsque les charbons ne sont pas encore enfouis, deux phénomènes sont particulièrement dommageables pour le matériau : le piétinement et la météorisation.

Les **effets du piétinement sont essentiellement ressentis lorsque le matériel affleure encore à la surface du sol**. Une fois recouvert, les pressions induites sont largement atténuées et les charbons sont très peu affectés (Chapitre V, point IV).

Les processus météoriques semblent particulièrement néfastes pour le matériau (points I des chapitres IV et V), d'autant plus lorsque les **températures sont basses**. À Gavarnie, la dispersion des charbons déposés en surface est logiquement supérieure à celle des dépôts enfouis, induisant la disparition d'une plus grande quantité de matériel plus rapidement : les **phénomènes de transport** -vent et ruissellements en particulier-, **en dispersant le matériel, réduisent ses chances d'être prélevé**, en contexte expérimental comme en contexte archéologique (matériel drainé hors de la zone de fouille, voire hors du site). De même, à Gavarnie, les concentrations initiales de charbons de bois n'étaient quasiment plus visibles après quelques années de dépôts seulement ; les agents de transport compliquent en ce sens la **lecture du terrain** au moment de la fouille, notamment en **perturbant l'organisation spatiale** du site. Ils doivent par ailleurs participer de la fragmentation du matériau en induisant des chocs (roulement des particules contre le sol, arrêt brutal au contact de ses aspérités, mobilisations répétées du matériel par les agents de transport) en association avec les variations des conditions thermiques et hydriques qui génèrent sur le matériau non encore enfoui des pressions internes importantes (retrait thermique, hydratation-déshydratation, gel-dégel, etc.). **L'intensité accrue de la fragmentation des charbons déposés en surface** par rapport aux dépôts enterrés à Gavarnie en témoigne. À Levens, l'absence de transport et des conditions thermiques plus clémentes produisent une fragmentation moins intense bien que conséquente (Chapitre V, point I). Celle-ci est encore réduite à Valbonne où la température moyenne est supérieure de 3 à 4°C. L'humidité et les précipitations importantes qui caractérisent cette station ne suffisent pas à endommager le matériau. De même, **le seul maintien en eau des charbons de bois** (chapitre V, point III) **comme les alternances d'imbibition-séchage des charbons de bois produisent peu d'effet**

(chapitre V, point III). Seul **un léger délitement des parties périphériques du matériau** est noté. Ceci est à mettre au compte de la structure chimique du charbon de bois. Essentiellement composé d'atomes de carbone et constitué de molécules non-polaires, le charbon se caractérise par une faible interaction intermoléculaire avec l'eau. C'est un matériau hydrophobe, qui doit au contraire subir un traitement particulier (physique ou chimique) pour pouvoir interagir avec d'autres molécules et notamment avec l'eau ; c'est le principe de l'« activation » : la création de sites actifs sur la surface du charbon est produite par oxydation ; *« certains carbones sont arrachés de leur structure aromatique laissant derrière eux des voisins avec des électrons célibataires. Afin d'apparier ces électrons, les charbons adsorbent alors des molécules, d'oxygène essentiellement, présentes dans l'atmosphère environnante une fois le traitement d'activation terminé »* (Meljac, 2004, p. 17). L'activation (fabrication de charbon actif) forme donc des sites polaires qui seront propices à l'adsorption d'espèces polaires et en particulier les molécules d'eau. Les liaisons chimiques créées sont alors de forte intensité. En l'absence d'activation, le corps du charbon n'est pas modifié par son maintien en solution aqueuse comme en témoignent nos résultats et la découverte fréquente de charbons bien conservés et étudiables en milieu humide. De même, si les études sur la structure atomique du charbon montrent que le pH du milieu peut favoriser l'altération diagénétique de la matière par oxydation – en particulier lorsque le pH est élevé – (Cohen Ofri *et al.*, 2006 ; Rebollo *et al.*, 2008 ; Braadbaart et Poole, 2009 ; Ascough *et al.*, 2010 ; 2011b ; chapitre I, § II.3.), l'essai mis en œuvre de manière à tester **l'incidence du pH sur les charbons de bois n'a pas produit d'altération visible de la macrostructure du matériau** (chapitre V, point III).

Toutefois, si l'eau seule ne génère pas d'effet réellement notable sur les charbons de bois, ceux-ci sont en revanche beaucoup **plus friables lorsqu'ils sont imbibés d'eau** et comme de nombreux matériaux poreux, ils **voient certainement leur résistance mécanique chuter**. Ils seront donc plus à même d'être affectés par les pressions mécaniques diverses, **la présence d'eau jouant alors un rôle d'amplificateur des altérations mécaniques**, mais ayant peu d'influence seule. Toutefois, la perte de résistance liée à l'imbibition du matériau n'a pas été mesurée dans notre travail et la fragilisation induite n'est donc pas quantifiée pour le moment.

Enfin, **la structure anatomique du matériau n'est altérée par aucun des processus testé et aucune perte de masse qui pourrait indiquer une modification structurelle du matériau n'est observée.**

Pour résumer et à l'échelle du matériau, différentes phases d'altération, dont les conséquences sont variables, doivent être envisagées.

Avant son enfouissement, le matériel présent à la surface du sol est susceptible d'être très largement affecté par les **processus de météorisation**, ainsi que par le **piétinement**. Cette première phase est à même de produire une importante fragmentation des charbons de bois, ainsi qu'un déplacement latéral (et éventuellement vertical) du matériel, pouvant conduire **i) à la disparition partielle ou totale des concentrations de charbons en tant que marqueur de l'organisation de l'espace, ii) à la perte définitive de tout ou partie du dépôt anthracologique par dispersion et évacuation hors du site et/ou par hyper-fragmentation.**

Il faut toutefois noter que les **processus de météorisation semblent très atténués en contexte de cavité** ; c'est du moins ce que nous avons pu observer dans la Grotte du Névé à Gavarnie dans laquelle nos dépôts n'ont quasiment pas été déplacés ou fragmentés. Nos charbons de bois étaient cependant localisés en dehors de la zone d'activité des coulées de débris, lesquelles ont au contraire grandement affecté (dispersion et perte de matériel) les autres dépôts expérimentaux (lithiques en particulier) dans la partie nord de l'entrée de la grotte. L'atténuation des processus de météorisation en grotte explique cependant une bonne part des différences de conservation des charbons de bois entre les sites de plein air, souvent pauvres, voire exempts de matériel anthracologique, et les cavités.

Par la suite, **une fois le matériel enfoui**, les charbons de bois ne sont plus affectés par les phénomènes de météorisation et paraissent **remarquablement résistants au piétinement**. Leur recouvrement par seulement 10 à 15cm de sédiment assure globalement la cohérence des fragments, et ce **d'autant plus que la granulométrie de la matrice sédimentaire est fine** (Chapitre V, point IV). En revanche, si des **pressions sédimentaires** s'exercent, induites par les cycles gel-dégel, le gonflement cryogénique différentiel ou les alternances de retrait-gonflement du sédiment, les charbons peuvent subir une **seconde phase de fragmentation**. Le caractère plus ou moins destructeur de cette seconde phase d'altération du matériau dépend en partie de la nature minéralogique et granulométrique de la matrice sédimentaire

(teneur en argiles – smectites en particulier – et limons notamment ; une matrice fine sera donc cette fois plus destructrice qu'une matrice grossière), de sa teneur en eau, de sa conductivité et de l'importance des variations thermiques et hydriques du milieu. **Le déclenchement du processus de fragmentation dépend évidemment du niveau d'expression des pressions qui s'exercent, en revanche, son intensité (le nombre de fragments produits) est majoritairement dépendante de l'essence et non de la contrainte subie** (cf. chapitre III).

La présence d'eau au cours de ces deux phases accentue l'impact des processus précités, en fragilisant mécaniquement le matériau et en facilitant/déclenchant les phénomènes de gonflement du sédiment, l'expression de pressions internes et le transport des charbons de bois. Par ailleurs, les études concernant la structure atomique du charbon ont démontré que la surface du matériau est oxydée en milieu basique (Cohen-Ofri *et al.*, 2006 ; Rebollo *et al.*, 2008 ; Ascough, 2011b). En contexte alcalin, le charbon oxydé est donc plus à même d'interagir avec les molécules d'eau, accentuant encore probablement sa friabilité et sa sensibilité aux processus mécaniques.

Au vu de nos résultats, il est possible d'envisager que des processus en chaîne de ce type, ou l'exposition du dépôt charbonneux à plusieurs phases d'altération provoquent sa disparition au moins partielle, essentiellement par hyper-fragmentation, facilitée ou non par un « ramollissement hydraulique » (Prick, 1996) et/ou une altération diagénétique.

II.2. La variabilité taxonomique et les facteurs influents

Nous avons abordé ici le charbon de manière générique, en tant que matériau. Cependant, nous avons observé, tant au cours de notre travail que dans la première partie de cette synthèse, une certaine variabilité du comportement des taxons, notamment liée à l'hétérogénéité des propriétés physiques et anatomiques héritées du bois. Quelques facteurs déterminants de cette variabilité ont pu être identifiés.

- *Masse volumique et réduction de masse*

La **masse volumique** du charbon varie en **fonction de la température** de carbonisation : du bois au charbon de bois, la perte de masse volumique est de l'ordre de 32% à 400°C, 40% à 500°C et 55% à 750°C. Elle est également, et essentiellement, **hétérogène selon l'espèce carbonisée** : la perte enregistrée varie de 33 à 50% dans nos essais du chapitre III réalisés en four à moufle. Les différences de densité observées entre les taxons carbonisés sont moins importantes que celles qui existent entre les bois d'origine, mais la masse volumique du charbon reste **globalement proportionnelle à celle du bois** initial. Par ailleurs, il apparaît que la perte de masse volumique est plus importante pour tous les taxons lorsque les carbonisations sont réalisées en foyer ouvert, l'ordre de grandeur étant cependant respecté entre les taxons ; les espèces plus et les moins denses le sont quel que soit le mode de carbonisation. D'après ces résultats, **la réduction de masse volumique est dépendante des conditions de carbonisation, mais également de l'essence puisqu'une certaine constante du taxon s'exprime quel que soit son mode de carbonisation.**

Du point de vue de la masse volumique, le charbon de bois est donc un matériau hétérogène. Or, nous avons pu observer que cette propriété est **un des facteurs qui influence la résistance mécanique** du matériau comme sa **fragmentation**.

Du point de vue des **propriétés mécaniques**, c'est **l'ampleur de la perte de masse volumique** induite par la carbonisation qui est **déterminante** ; elle provoque une perte de résistance à la rupture et explique l'essentiel des propriétés mécaniques des charbons de bois. En revanche, la **relation masse volumique/seuil d'élasticité n'est pas linéaire** (chapitre III) : les charbons de faible densité ont un seuil d'élasticité bas, tandis que les charbons denses ont un seuil d'élasticité très haut ou très bas. Dans ce dernier cas, ce sont visiblement les caractéristiques anatomiques, qui, en induisant des zones de fragilité du matériau, provoquent sa rupture sous des pressions faibles malgré sa densité élevée.

L'incidence de la masse volumique sur la fragmentation des charbons de bois a été mise en évidence à plusieurs reprises au cours de notre travail. Lors des tests de **compression mécanique** comme dans les simulations de **cycles gel-dégel**, la masse volumique des charbons de bois est corrélée positivement avec la fragmentation : **plus les charbons sont denses et plus ils se fragmentent** (chapitre III ; chapitre IV, point II).

Inversement, lors des essais de **retrait-gonflement du sédiment**, qui mettent principalement en œuvre des **forces de traction** dans notre protocole, la masse volumique est corrélée de manière négative à la fragmentation (chapitre V, point II) : **les charbons les plus denses sont les moins fragmentés** et inversement.

Du point de vue des modalités de la fragmentation, lorsque les charbons sont soumis à des forces de compression, la densité apparaît comme un facteur favorisant la production d'un nombre de fragments très important dans la classe de taille inférieure ([1-2mm]).

- *Porosité*

Deux indices de porosité ont été calculés pour nos échantillons et inclus dans nos analyses comme facteurs explicatifs des variations des propriétés mécaniques et de fragmentation des taxons. L'un concerne la porosité globale des charbons de bois (bois initial et final étant considérés de manière indifférenciée) et l'autre mettant en évidence la présence d'une zone poreuse plus ou moins marquée (il est calculé à partir de la différence de porosité entre le bois initial et le bois final).

La **porosité globale** semble **peu incidente sur les propriétés mécaniques** des charbons de bois, lesquelles sont principalement conditionnées par la masse volumique et les caractéristiques anatomiques. La **présence d'une zone poreuse marquée** notamment (second indice de porosité) **diminue le seuil d'élasticité** des essences concernées, même lorsque celles-ci présentent une densité élevée (chapitre III).

Par ailleurs, nous avons observé, tant lors des tests de compression (chapitre III) que lors des essais de gel-dégel du sédiment (chapitre IV, point II), que la présence d'une **zone poreuse marquée conditionne en partie l'intensité de la fragmentation** et en particulier la production de gros fragments (classes]2-4mm] et >4mm).

En revanche, dans les essais de **météorisation** mis en œuvre à **Valbonne** (chapitre V, point I) et lors des tests **d'imbibition-dessiccation** des charbons de bois eux-mêmes (chapitre V, point III), l'indice de **porosité globale** apparaît comme un **facteur induisant en partie le niveau de fragmentation des taxons**. Il est à noter que l'eau dans ces essais est l'agent d'altération quasi exclusif du matériau. L'action de l'eau, dont nous avons vu qu'elle constitue seulement un facteur secondaire de dégradation des charbons de bois, paraît donc plus efficace sur les taxons poreux.

- *Anatomie*

Outre la présence d'une **zone poreuse marquée** dont nous avons évoqué précédemment les effets sur la résistance du matériau et sa fragmentation, les **gros rayons ligneux ou des vaisseaux disposés en longues files radiales** semblent, dans de nombreux cas, **créer des zones de faiblesses** dans le charbon qui, si elles n'induisent pas nécessairement la rupture du matériau sous de faibles pressions, accentuent en revanche **l'intensité de la fragmentation** des taxons concernés (*Quercus*, *Fagus*, *Corylus*, *Carpinus* par exemple). D'autres critères anatomiques paraissent au contraire renforcer la résistance mécanique du charbon, sans pour autant éviter une fragmentation importante une fois le seuil d'élasticité franchi. C'est par exemple le cas des **épaississements spiralés** dont il semble qu'ils continuent partiellement à jouer leur **rôle de soutien après la carbonisation** du bois (chapitre III).

Les propriétés anatomiques des taxons ont donc une incidence sur la résistance mécanique du matériau comme sur leur comportement à la fragmentation, les deux processus n'étant cependant pas corrélés. Les regroupements opérés par la CAH (ce chapitre, § 1.3.) paraissent confirmer **l'influence et l'interaction des propriétés physiques et anatomiques des taxons sur leur fragmentation, celle-ci variant notamment en fonction de l'essence d'origine.**

Ainsi, les taxons qui présentent des zones de faiblesse naturelles, liées à leur anatomie, sont ceux qui se fragmentent le plus : dans le premier lot de bois, *Quercus pubescens*, *Quercus pedunculata*, *Fagus*, *Corylus*, *Carpinus* et *Acer* sont concernés. Dans une moindre mesure, les taxons les plus légers et poreux tels *Populus tremula*, *Pinus sylvestris* sain et altéré, sont plus affectés que le reste des essences et paraissent plus sensibles au contact de l'eau. Dans le second lot, *Corylus*, *Populus alba* et, dans une moindre mesure *Carpinus*, se distinguent également. En revanche *Quercus pubescens* y est régulièrement moins fragmenté que les autres taxons. Cela pourrait donc signifier qu'il existe en outre une certaine variabilité intra-spécifique.

II.3. Variabilité intra-spécifique, intra-genre et autres facteurs de variabilité

Les variables intra-genre et intra-spécifique n'ont pas été incluses de manière systématique dans les différents protocoles mis en place, ce qui constitue une limite importante de notre travail. Nos résultats permettent toutefois d'aborder au moins partiellement ces aspects.

Dans le lot de bois A, deux espèces du genre *Pinus* et deux espèces du genre *Quercus* sont présentes. De même, chacun des lots de bois utilisé comprend une espèce du genre *Populus*. Par ailleurs, un représentant de *Quercus pubescens*, *Corylus avellana*, *Carpinus betulus* et *Betula pubescens* est présent dans chacun des lots de bois.

La comparaison du niveau de fragmentation moyen de ces taxons met en évidence une variabilité qui s'exprime entre les espèces d'un même genre, et tantôt faiblement ou fortement entre espèces similaires.

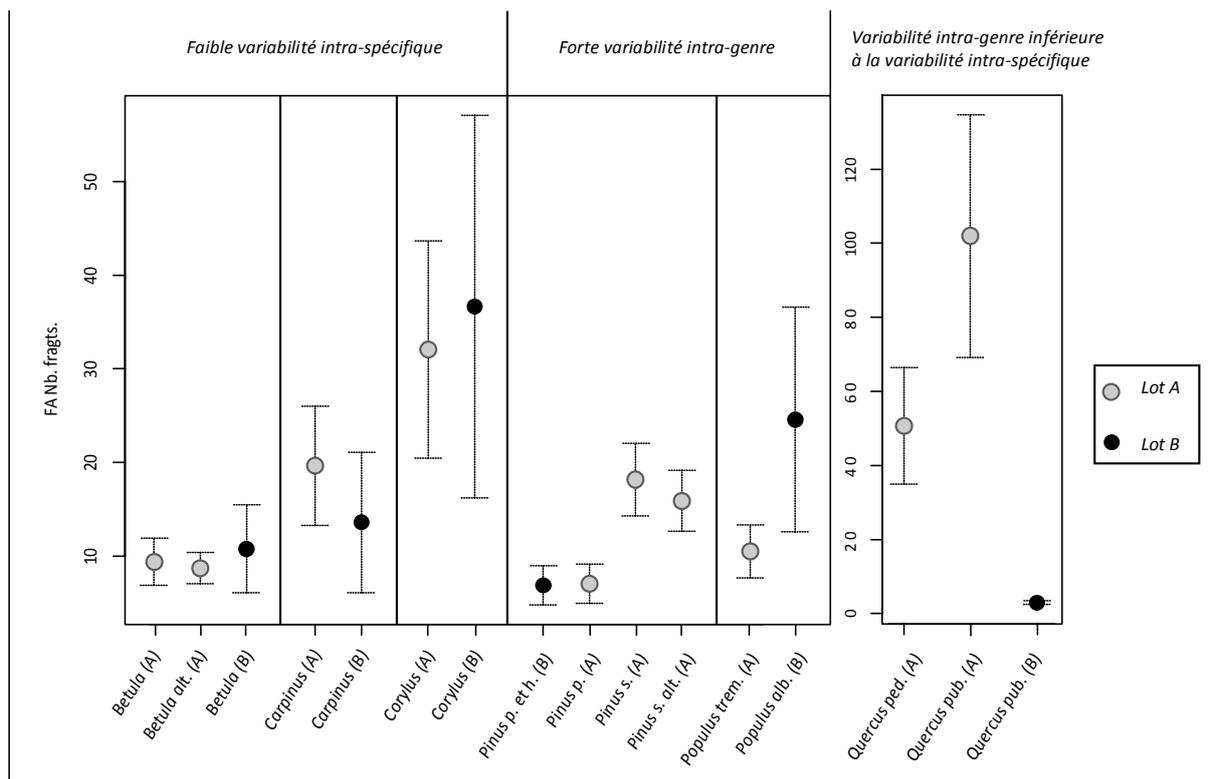


Figure 169 : Mise en évidence de la variabilité intra-spécifique et intra-genre de la fragmentation des taxons. Facteur d'augmentation moyen du nombre de fragments par espèce et/ou par genre. Les intervalles correspondent à l'erreur standard.

II.3.1. Variabilité intra-spécifique

- *Betula pubescens, Corylus avellana et Carpinus Betulus*

Les trois essences sont présentes à la fois dans le lot de bois A et le lot B. Les deux représentants de *Betula pubescens, Corylus avellana* comme ceux de *Carpinus Betulus* présentent un comportement proche d'un lot de bois à l'autre. *Betula* fait partie des taxons peu fragmentés dans le lot A, quel que soit son état sanitaire ante-combustion. Il est légèrement plus fragmenté dans le lot B, mais sans atteindre des valeurs remarquables. Les valeurs moyennes du facteur d'augmentation du nombre de fragments du lot A sont entièrement contenues dans l'intervalle d'erreur du lot B (fig. 169). Les deux représentants de l'espèce ne semblent pas se distinguer fortement. *Carpinus* se fragmente plus que *Betula* et moins que *Corylus* ; il suit dans l'un comme dans l'autre des lots, une tendance à la fragmentation moyenne à haute. Les deux séries de valeurs se recoupent en grande partie. Dans le cas de *Corylus*, les valeurs du lot A sont comprises dans la marge d'erreur du lot B. *Corylus* se distingue par une importante fragmentation dans l'un comme dans l'autre des lots. **La variabilité intra-spécifique est relativement peu marquée pour chacun de ces taxons.**

II.3.2. Variabilité intra-genre

- *Pinus pinaster et Pinus sylvestris*

Les deux essences sont relativement peu différenciées du point de vue de leurs propriétés mécaniques comme de leur fragmentation à l'issue des tests de compressions axiales (chapitre III). En revanche, dans la plupart des essais mis en œuvre par la suite, *Pinus pinaster* n'est pas ou très peu fragmenté, tandis que *Pinus sylvestris* est affecté par une partie des processus testés. La classification ascendante hiérarchique réalisée sur l'ensemble des données acquises distingue les deux espèces, *Pinus sylvestris* étant globalement plus fragmenté que *Pinus pinaster* (fig. 160 à 162). La variabilité intra-genre est mise en évidence sur la figure 169 : les valeurs moyennes du facteur d'augmentation du nombre de fragments des deux essences, marge d'erreur standard comprise, sont bien distinctes. Par ailleurs, on

note que *Pinus pinaster* dans le lot A présente des valeurs moyennes très proche de « *Pinus p. et h.* » dans le lot B, lequel regroupe *Pinus pinaster* et *halepensis*. Le pin d'Alep et le pin maritime semblent donc se fragmenter *a priori* d'une manière relativement similaire. De même, deux représentants du pin sylvestre sont présents dans le lot A, l'un à l'état sain, l'autre altéré. La différence de fragmentation est plus forte avec les autres espèces du genre, qu'entre les deux individus Pin sylvestre malgré leur état sanitaire ante-combustion distinct (la même observation peut être faite entre *Betula* sain et altéré, cf. fig. 169). **La variabilité intra-genre est donc ici plus forte que la variabilité intra-spécifique. Les différences de densité et de porosité des charbons de *Pinus pinaster* et *Pinus sylvestris* semblent être en partie responsables de leur comportement dissemblable.**

- *Populus alba* et *Populus tremula*

À l'instar de *Pinus sylvestris*, *Populus tremula* se distingue dans une partie des expérimentations mises en œuvre à partir du lot de bois A, sans pour autant faire partie des espèces les plus fragmentées. À l'inverse, *Populus alba* présente dans le second lot de bois (B) une fragmentation globalement plus importante que celle des autres taxons, qui le distingue à Gavarnie comme dans les essais de piétinement du matériel enfoui.

Les valeurs moyennes des deux espèces sur la figure 169 ne se recoupent quasiment pas et ***Populus alba* semble être plus sujet à la fragmentation que *Populus tremula*.**

- *Quercus pedunculata* et *Quercus pubescens*

Quercus pedunculata est moins fragmenté que *Quercus pubescens* dans tous les essais où les deux espèces sont présentes, mais toutes deux se distinguent généralement des autres taxons par une fragmentation globalement plus importante (l'échelle de fragmentation de ces taxons, largement supérieure à celle des autres essences a pour cette raison été conservée sur la figure 169). À l'inverse, à l'issue des essais de retrait-gonflement, les deux essences sont plus faiblement fragmentées que d'autres taxons. Ainsi, que le processus de fragmentation soit marqué ou non en fonction des processus à l'œuvre, **les deux représentants du genre *Quercus* présentent dans le lot de bois A un comportement qui se distingue de celui des autres taxons** (la procédure de comparaison par paires isole

d'ailleurs ces deux essences). Sur la figure 169, les valeurs moyennes de *Quercus pedunculata* et *Quercus pubescens* ne se recoupent pas, mais *Quercus pedunculata* présente toutefois une fragmentation supérieure à celle de tous les autres taxons et il constitue l'essence qui se rapproche le plus de *Quercus pubescens* (cf. fig. 156 et 159) quelle que soit l'expérimentation.

II.3.3. Le cas particulier de *Quercus pubescens*

Un deuxième représentant de *Quercus pubescens* est présent dans le lot B. Les différences de comportement de cette espèce sont extrêmement marquées d'un lot de bois à l'autre. Lorsqu'il est atteint par les sollicitations mises en œuvre, ***Quercus pubescens* est toujours l'espèce la plus fragmentée dans le lot A, tandis qu'il constitue l'espèce la moins fragmentée relativement aux autres taxons dans le lot B.**

La variabilité intra-spécifique est donc ici plus importante que la variabilité intra-genre. Plusieurs interprétations sont possibles. Soit la variabilité intra-spécifique de *Quercus pubescens* est très importante, ce qui semble curieux vu la variabilité intra-genre relativement faible évoquée précédemment. Soit d'autres facteurs induisent en partie ces différences de comportement. Si une moindre sensibilité aux processus testés à l'aide du lot B pourrait éventuellement expliquer la faible fragmentation de *Quercus pubescens* à l'issue de l'expérience de piétinement du matériel enfoui, une telle explication doit être rejetée à Gavarnie. Les charbons y sont soumis à la fois aux alternances gel-dégel et aux processus météoriques, qui, lorsqu'ils sont mis en œuvre séparément à l'aide du lot A, produisent une intense fragmentation de ce taxon.

Par contre, à Gavarnie comme dans l'expérience de piétinement de Castanet, les fragments utilisés étaient, nous l'avons évoqué, plus petits que la moyenne des autres taxons (et plus petits que les fragments utilisés dans le lot de bois A). Seuls les dépôts de 2009 à Gavarnie contenaient des fragments un peu plus gros. Si l'on se reporte aux figures 24, 25 et 26 (chapitre IV, point I), on constate que la fragmentation de *Quercus* pour cette année-là est moins différente de celle des autres taxons. L'augmentation de la taille des fragments

initiaux paraît donc réduire les différences de fragmentation et il est probable qu'**un effet d'échelle** participe de la variabilité de comportement notée entre les deux lots de bois.

Il est également possible que des différences de temps et de conditions de séchage du bois (homogènes à l'intérieur des lots, mais peut-être moins entre les lots), de conduite de la combustion ou que des variables stationnelles puissent être en cause sans que l'on puisse pour l'instant trancher la question. Seuls de nouveaux tests permettront d'apporter un meilleur éclairage sur le **comportement atypique de *Quercus pubescens*** qui est **sur-fragmenté dans l'un des lots et sous-fragmenté dans le second**.

II.3.4. État du bois ante-combustion

Un dernier point qui concerne l'altération ante-combustion du bois doit être abordé. À l'évidence, et ainsi que l'a démontré Théry (1998, 2001), les charbons issus de bois altérés avant leur combustion présentent des propriétés physico-mécaniques amoindries : leur résistance diminue de 50 à 90% en fonction de la souche inoculée et du niveau de contamination du bois ante-combustion entre les charbons issus de bois sain et ceux issus de bois altérés. D'après ces tests, les lots de charbons issus de bois altérés sont moins résistants à la compression et se fragmentent donc plus vite que les charbons issus de bois sains. Les tests réalisés parallèlement de manière à documenter les effets des alternances gel-dégel sur les charbons de bois montrent que l'altération du bois ante-combustion détermine le niveau de fragmentation des charbons (Théry, *op. cit.*). Dans nos essais, le facteur « altération » n'influence que ponctuellement la fragmentation. Nos deux taxons intégrés sous leur forme altérée ne montrent généralement pas de différences majeures de fragmentation vis-à-vis de leur homologue sain. La classification ascendante hiérarchique (fig. 160 à 162, ce chapitre) regroupe ensemble *Betula* sain et altéré d'une part et *Pinus sylvestris* sain et altéré d'autre part. Les taxons altérés ne sont pas discriminés par l'analyse. Sur la figure 169, les valeurs moyennes de *Betula* altéré sont comprises dans l'intervalle de *Betula* sain et *Pinus sylvestris* altéré est en moyenne légèrement moins fragmenté que *Pinus sylvestris*. D'après nos résultats, la variable taxon semble plus incidente que la variable état du bois sur la fragmentation. Il faut toutefois noter que les deux taxons altérés présentent une fragmentation plus conséquente qu'à l'accoutumée à l'issue des tests de retrait-

gonflement du sédiment et d'imbibition-dessiccation. Du point de vue de la production de petits fragments, ils sont réunis dans un même sous-groupe lors des essais de retrait-gonflement du sédiment (fig. 99) et ils font toujours partie du groupe dont la fragmentation est plus élevée dans ces deux expérimentations, lesquelles mettent en œuvre un processus d'hydratation-déshydratation répétée des charbons de bois. Il semble donc que la variable « altération » accentue les effets produits par l'eau sur les charbons de bois, laquelle est identifiée par ailleurs comme un facteur qui amplifie l'action des processus mécaniques. Ceci explique peut-être en partie l'apparente contradiction de nos résultats vis-à-vis de ceux obtenus précédemment par Théry ; dans ses essais, les alternances gel-dégel étaient mises en œuvre à partir de charbons sains et altérés immergés dans l'eau ou non-immersés. Les échantillons dégradés immergés produisaient alors plus de fragments que les autres. L'effet d'usure, d'hydratation-déshydratation des charbons, couplé aux pressions générées par le gonflement de l'eau lors du gel accentuent probablement dans ce cas l'effet de la variable « altération », moins perceptible dans nos essais. Ces résultats sont sans doute plus complémentaires que contradictoires et ils illustrent bien la difficulté qu'il y a à comparer les résultats issus d'expériences mettant en œuvre des protocoles différents pour documenter des processus *a priori* similaires.

II.3.5. Conséquences de la variabilité taxonomique de la fragmentation en anthracologie

D'après nos résultats, la variabilité intra-spécifique semble relativement réduite hormis dans le cas de *Quercus pubescens* qui présente des comportements extrêmes (sur-fragmentation et sous-fragmentation en fonction de l'individu) difficiles à expliquer. En revanche, **à l'intérieur d'un même genre, le comportement à la fragmentation des différentes espèces se distingue régulièrement.** Ce constat induit un certain nombre de conséquences du point de vue de l'anthraco-analyse.

En effet, à l'heure de l'identification spécifique, de nombreux taxons ne peuvent être déterminés au-delà du genre par la seule observation microscopique. C'est par exemple le cas du peuplier, ou encore des chênes parmi lesquels on distingue le plus souvent seulement les espèces à feuillage caduc de celles à feuilles persistantes. Lorsque la détermination s'aventure au-delà du genre, elle concerne régulièrement un anthraco-type regroupant

plusieurs espèces d'un même genre sans qu'il soit possible d'être plus précis. Par exemple, parmi les pins affectionnant les ambiances froides, il est possible de distinguer *Pinus cembra* de « *Pinus type sylvestris* » qui regroupe *Pinus sylvestris*, *Pinus mugo* et *Pinus nigra* dont le mode de fragmentation peut éventuellement différer. Régulièrement, au sein d'un genre et parfois même d'une sous-famille (*Pomoideae* par exemple) ou d'une famille (notamment les légumineuses), les différences anatomiques sont trop ténues et la variabilité inter-individuelle trop grande pour que la détermination soit poussée jusqu'à l'espèce sans risque d'erreur. Le plus souvent, on se borne à déterminer des anthraco-types et ce sont des arguments écologiques qui permettent *a posteriori* de proposer une attribution à l'une ou l'autre espèce, ou à un ensemble d'espèces possibles.

Une observation similaire a pu être faite à l'issue des études sur la combustion, qui ont mis en évidence un comportement stationnel (intra-spécifique), mais aussi intra-genre des taxons vis-à-vis de la production de résidus. Dans ces essais, *Pinus sylvestris*, *Pinus pinaster* et *Pinus halepensis*, de même que *Populus alba* et *Populus tremula* se distinguent du point de vue de la quantité de restes qu'ils produisent. Fragmentation et réduction de masse varient donc entre les taxons à l'issue de la combustion, et notamment entre espèces du même genre (Théry *et al.*, 2010b).

La mise en évidence d'une forte variabilité intra-genre, agissant au moment de la carbonisation du bois comme au cours de la refragmentation des charbons une fois le dépôt initial formé, implique qu'il est **extrêmement difficile**, pour ne pas dire impossible, de **déterminer des constantes de fragmentation des taxons à l'échelle où nous sommes capables de les déterminer**. La mise sur pied **d'indices correctifs** qui permettraient de réajuster la représentation des taxons au sein de l'assemblage anthracologique en fonction de leur comportement à la fragmentation paraît, en l'état actuel des connaissances, un **objectif bien difficile à atteindre**. D'autant plus que nous n'avons pas pour l'heure une vision complète de l'effet conjoint combustion/fragmentation post-dépositionnelle sur les taxons et que les processus post-dépositionnels paraissent, au vu de nos résultats, agir de manière hétérogène sur le matériel en fonction de l'essence d'origine (les taxons les plus et les moins fragmentés sont différents en fonction du processus à l'œuvre ; les espèces les plus denses sont par exemple tantôt les plus affectées ou les moins affectées par la mise en œuvre expérimentale). Ainsi, **si correctifs il doit y avoir, ceux-ci ne peuvent être fondés que**

sur une démarche visant à repérer les sur- et sous-représentations des taxons au sein de chaque nouvel échantillon analysé.

II.4. Identification des biais quantitatifs et représentativité de l'assemblage anthracologique

Quels éléments avons-nous donc à notre disposition pour tâcher d'identifier les biais quantitatifs dans les échantillons que nous étudions ? Ces biais sont-ils mesurables et peut-on dès lors imaginer un moyen de les corriger ?

Avant toute chose revenons quelques instants sur les acquis qui ont permis d'affirmer la pertinence de l'anthracologie pour la reconstitution des paléoenvironnements. Nous l'avons rappelé en introduction de ce manuscrit, la **représentativité paléoécologique** des charbons de bois est fondée sur des arguments intrinsèques qui découlent de l'observation des résultats anthracologiques eux-mêmes : i) les assemblages sont riches en taxons (indiquant par-là que la sélection des espèces n'est pas la règle première à l'heure de la collecte du bois), ii) les résultats sont reproductibles pour une période et une région données, iii) les associations végétales mises en évidence ressemblent qualitativement et quantitativement aux formations actuelles connues. Ces observations valident l'hypothèse anthracologique telle que formulée par Chabal (1991, 1992, 1994).

Toutefois, la pertinence de l'anthracologie pour la restitution des paléovégétations n'est assurée qu'à la condition du respect **d'impératifs méthodologiques** relatifs aux caractéristiques de l'échantillon et de son étude : i) les charbons de bois doivent provenir du bois de feu domestique (de contextes non-spécialisés), ii) ils doivent être issus de dépôts (couches archéologiques ou structures) représentatifs d'une durée d'activité longue, iii) ils doivent faire l'objet d'un prélèvement rigoureux et systématique incluant l'ensemble des tailles de fragments (le tamisage ou la flottation sont de ce fait indispensables à la cohérence de l'échantillonnage sur le terrain, par opposition au prélèvement manuel qui opère nécessairement un tri fondé sur la visibilité et la maniabilité des résidus), iv) l'analyse doit concerner un nombre suffisant de fragments pour assurer la représentativité statistique de l'échantillon (Chabal, *op cit.*).

Une fois posé le cadre restrictif de la représentativité paléoécologique des charbons de bois, un certain nombre **d'outils** se sont avérés nécessaires pour « **vérifier** », *a posteriori* et au coup par coup, la **pertinence des résultats** de l'analyse : i) la construction de courbes effort-rendement (ou aire-espèce) est un bon moyen d'évaluer le moment à partir duquel la majorité des taxons présents dans l'échantillon a été identifiée et lorsque l'effort supplémentaire d'analyse nécessaire pour accroître la liste floristique devient un travail trop conséquent au regard de l'apport d'information escompté (Chabal, 1982, 1988), ii) suite à l'analyse, le calcul de l'indice de Pareto correspondant à l'échantillon étudié permet de vérifier sa pertinence écologique. Les communautés végétales des milieux tempérés, en situation équilibrée, se caractérisent en effet par une répartition entre taxons dominants et taxons subordonnés correspondant respectivement à 80 et 20% de la biomasse (Godron, 1984). Une liste floristique cohérente du point de vue écologique associée à un indice de Pareto – fondé sur les rangs des taxons exprimés en pourcentage et leur représentation dans l'échantillon – proche de 20/80, sont des arguments consistants en faveur de la bonne représentativité écologique et phytosociologique de la formation végétale documentée²³ (Chabal, 1991).

Cette construction théorique et méthodologique comme la mise sur pied des outils mentionnés viennent palier la **difficulté d'établir des fonctions de transfert simples entre les charbons de bois et la végétation** dont ils sont issus. En effet, en anthracologie, l'unité de mesure n'est pas une entité finie (une pièce lithique, une partie anatomique d'un animal, un grain de pollen) – éventuellement fragmentaire – que l'on peut envisager en tant que telle, mais bien un « fragment » carbonisé d'un organisme végétal ligneux auquel on ne peut (en l'état actuel de nos connaissances) se référer en termes de nombre d'individus, de biomasse végétale, ni même de volume de bois mis au feu. Les trois phases de genèse de l'assemblage anthracologique – collecte du bois, combustion, processus post-dépositionnels – génèrent des distorsions d'ampleur inconnue entre la végétation initiale et l'image qu'en fournit l'analyse de charbons de bois. La question du passage de l'une à l'autre a animé tout un pan de la recherche, d'abord en tentant de démontrer la légitimité de la

²³ Notons cependant qu'un indice de Pareto inférieur à ce ratio peut également traduire une situation de déséquilibre de la végétation source.

pratique anthracologique, puis en explorant les moyens de préciser la fonction inconnue qui relie la végétation initiale à son image anthracologique. L'étude de la **fragmentation** tient évidemment une place importante dans ces travaux qui sont toutefois restés relativement ponctuels.

Les **données antérieures** ont montré que : i) la combustion induit des distorsions quantitatives liées à une réduction de masse et une fragmentation différentielle des taxons (Bazile-Robert, 1982 ; Rossen et Olson, 1985 ; Smart et Hoffman, 1988 ; Scott et Jones 1991 ; Loreau 1994 ; Vaughan et Nichols 1995; Belcher *et al.* 2005 ; Lingens *et al.* 2005 ; Braadbaart et Poole, 2008). Toutefois, les travaux les plus récents sur la question, mettant en œuvre un nombre considérable de répliques expérimentales, montrent que ces distorsions, considérées globalement et dans une perspective « anthracologiques », sont relativement faibles (Théry-Parisot *et al.*, 2010b ; Théry-Parisot, 2013), ii) dans les sites récents, l'état final de fragmentation diffère peu entre les taxons bien que des aléas (sous- et sur-fragmentation) subsistent, iii) cette « loi de fragmentation unique » des taxons se caractérise par une distribution des fragments en fonction de leur masse proche d'une loi de Poisson. Tous les taxons présentent un grand nombre de fragments de masse faible qui va décroissant relativement régulièrement jusqu'aux fragments de masse élevée, bien moins représentés (Chabal, 1989, 1990, 1991, 1997). La distribution se caractérise donc par une forte proportion de fragments de masse faible et une faible proportion de fragments de masse élevée.

Des caractéristiques de cette distribution découlent un certain nombre de conséquences en termes de **représentation des taxons selon la taille des fragments étudiés**. Ainsi, d'après Chabal, « *un taxon peu fréquent a des chances d'être parmi les petits fragments, simplement parce que ceux-ci sont mieux représentés* » (1989, p. 58). Inversement, « *plus un taxon est fréquent, plus il a de chances de donner de gros fragments* » (Chabal, 1991, p. 62). Il en ressort que l'étude préférentielle des seuls gros fragments contribuerait à surreprésenter les taxons les plus fréquents et risquerait de ne pas faire apparaître les taxons rares. « *Le prélèvement ou l'identification des seuls gros fragments est donc à éviter absolument* » (*ibid.*, p. 63) (en ce sens, le prélèvement manuel sur le terrain est à bannir). Notons qu'il s'agit ici d'une sélection qui porterait sur les plus gros fragments de la classe >4mm, puisque c'est à

partir de cette classe uniquement qu'est menée l'analyse de Chabal. Une telle sélection semble en effet fort peu propice à la cohérence de l'analyse. En revanche si l'on envisage une sélection en termes de classes de taille de fragments – charbons compris dans la classe [2-4mm] / ou >4mm –, la question de la représentation des taxons reste ouverte. Les résultats les plus récents et complets sur la question ont montré que l'information qualitative et quantitative fournie par les charbons compris entre 2mm et 4 ou 5mm (selon les auteurs) et celle issue de l'analyse de fragments supérieurs à 4 ou 5mm diffèrent peu (Badal Garcia, 1992 ; Chabal, 1988, 1991 ; Henry, 2011). Dans certains échantillons, la représentation d'une partie des taxons varie fortement d'une classe de taille à l'autre (Henry, 2011), mais *in fine*, l'analyse conduit à la même interprétation paléoenvironnementale en termes de structure et d'évolution de la végétation. Les essences les plus fréquentes se retrouvent dans les deux classes de taille et les deux classes de taille contribuent à faire apparaître les taxons rares (Badal, 1992 ; Henry, 2011). Toutefois, « *les fragments de la maille supérieure contiennent les taxons les plus fréquents de l'assemblage dans des proportions supérieures à celles de la maille plus petite* » (Henry, 2011, vol. 2, p. 40). Ainsi, si l'interprétation finale est globalement identique, les différences quantitatives observées incitent à la prudence et les auteurs préconisent, comme l'indiquaient déjà Smart et Hoffmann en 1988, de « choisir » une classe de taille et surtout, de ne pas considérer sur le même plan les résultats acquis à partir de fragments appartenant à des classes de taille différentes. Pour autant, rien n'indique qu'il soit plus « juste » de « choisir » une classe plutôt qu'une autre et si la classe >4mm est sans doute la plus étudiée, c'est pour des raisons de commodité et de rapidité de l'analyse plus qu'en fonction d'arguments objectifs relatifs à la représentativité.

Comment nos données s'intègrent-elles à ce cadre méthodologique et conceptuel général et quels en sont les apports ?

- *Mode de fragmentation et potentiel d'identification des biais quantitatifs*

Le travail que nous avons mené apporte quelques éléments concernant le mode de fragmentation des charbons de bois et des taxons qui corroborent en partie les données

existantes. D'après nos résultats, la fragmentation des charbons de bois – dans notre cas, il s'agit exclusivement de la fragmentation postérieure à la formation du dépôt – se caractérise très généralement par une grande proportion de petits fragments et une plus faible proportion de gros fragments, et ce pour tous les taxons (fig. 164 et 166).

Parallèlement aux données présentées plus haut (proportions calculées à partir du nombre de fragments dans les classes [1-2mm], [2-4mm] et >4mm), le matériel collecté à Gavarnie et son protocole d'analyse (pesée des fragments individuellement au moment de leur identification) a permis la réalisation d'histogrammes de fragmentation semblables à ceux mis au point par Chabal (cf. annexe V.1.). Ils sont fondés uniquement sur la fraction supérieure à 4mm et montrent une distribution proche de celle mise en évidence à Lattes et au Marduel : la répartition du nombre de fragments par classe de masse de 0.03g est caractérisée par un grand nombre de fragments de masse faible et un faible nombre de fragments de masse élevée. La distribution va globalement decrescendo des classes de masse les plus faibles aux plus élevées sans pour autant suivre une loi statistique de paramètre fixe. La variation vis-à-vis d'une distribution théorique régulière est liée à des aléas de sous-fragmentation (quelques fragments isolés dans les classes de masse élevée) et de sur-fragmentation (nombre disproportionné de fragments dans les classes de masse réduite). Ils montrent par ailleurs que le type de dépôt (ici en surface ou enfoui) a une influence sur la fragmentation des charbons de bois et que celle-ci s'exprime de la même manière quel que soit le taxon (les fragments des classes élevées sont de masse bien plus faible dans les dépôts de surface comparativement aux dépôts enterrés pour tous les taxons). Ainsi, que l'on considère l'éventail des classes de masse des fragments supérieurs à 4mm ou le nombre de fragments par classe de taille en incluant l'ensemble des fragments supérieurs à 1mm, **la distribution de la fragmentation suit une distribution dans laquelle le nombre de fragments est inversement proportionnel à leur taille ou leur masse** – ce qui revient à formuler la même observation puisqu'en dehors de quelques aléas liés à la variabilité de la densité à l'intérieur du bois et donc des charbons, les fragments les moins lourds correspondent aux plus petits fragments et inversement –.

La fragmentation des charbons de bois, comme des solides en général, génère une **distribution granulométrique** qui, sans suivre une loi mathématique absolue, valable en

toute situation, quel que soit l'échantillon étudié, doit en tout cas pouvoir être **approchée via des principes mathématiques et statistiques**.

Dans son étude du matériel de Lattes et du Marduel, Chabal remarquait que la distribution des fragments se rapproche d'une loi binomiale et que la comparaison de la distribution de l'échantillon avec la loi mathématique qui s'en rapproche le plus pourrait éventuellement servir à déterminer les aléas de fragmentation et à les corriger, mais au prix, sans doute, d'une perte d'information. De même, Pernaud en 1997 a utilisé la loi log-normale pour s'assurer que son matériel d'étude, provenant de paléochenaux, n'avait pas fait l'objet d'un tri granulométrique du fait de la circulation de l'eau. Il se fondait pour cela sur les travaux d'Epstein qui a montré en 1948 que la loi log-normale constitue une bonne approximation mathématique des mécanismes de fragmentation des solides.

Dans l'une comme dans l'autre de ces études, le travail de mise en évidence de la distribution qui caractérise la fragmentation de l'échantillon a nécessité la pesée individuelle des fragments qui représente un investissement en temps considérable. Une telle mise en œuvre est envisageable dans le cadre d'un travail ponctuel ou doctoral mais beaucoup moins dans une **pratique « quotidienne » de l'anthracologie**.

Étant donné que la proportion de fragments dans chaque classe de taille est relativement homogène entre les taxons issus d'un même échantillon et que la taille des gros fragments doit nécessairement diminuer lorsqu'augmente le nombre de petits fragments, il nous est apparu initialement que la **taille des gros fragments** et les **écarts vis-à-vis de la répartition moyenne des fragments – en termes de proportions – au sein des différentes classes de taille** devraient permettre de repérer les aléas de sur- et sous-fragmentation des taxons.

Un taxon qui présenterait de plus gros fragments que le reste de l'échantillon dans la classe de taille supérieure et une proportion moins importante de petits fragments dans la classe de taille inférieure peut être considéré comme sous-fragmenté. Inversement, un taxon dont les gros fragments sont plus petits (et qui peuvent dès lors être aussi plus nombreux) et qui fournit beaucoup de fragments dans la classe de taille inférieure est caractéristique d'une sur-fragmentation. La prise en compte du **poids total des gros fragments** pour les taxons sous-fragmentés et du **poids total des petits fragments** dans le cas de sur-fragmentations, pourrait alors être envisagée pour **pondérer** les données numériques fondées sur le nombre de fragments.

Toutefois, une telle observation n'est possible que si toutes les tailles de fragments ont été étudiées en nombre suffisant dans l'échantillon. Dans le présent manuscrit, nos résultats sont issus d'expérimentations dans lesquelles nous avons pu séparer au départ les taxons et il nous a donc été possible de quantifier l'intégralité des classes de taille pour chaque essence. Dans certains cas, qui ont nécessité l'identification taxonomique des charbons *a posteriori*, nous avons analysé, au moins ponctuellement, la totalité des fragments supérieurs à 1mm, ce qui a également représenté un lourd investissement en temps qui ne nous semble pas plus généralisable que la pesée de chaque fragment dans une pratique au quotidien, et ce d'autant moins pour les anthracologues qui travaillent en archéologie préventive et voient leur temps d'étude réduit à minima.

En définitive, l'un des moyens le plus simple et efficace pour détecter les aléas de sous- et sur-fragmentation des taxons nous semble avoir été proposé par Piqué (1999) dans l'objectif initial de mettre en évidence des différences de préservation entre des dépôts anthracologiques issus de plusieurs niveaux archéologiques et, éventuellement des problèmes de conservation différentielle des taxons. La technique mise au point utilise un **indice fondé sur la relation entre le nombre total de fragments** (par taxon et par niveau) **et leur poids total**. D'après l'auteur, une forte corrélation entre les variables nombre et poids « *implique que la variable poids dépend, dans une large mesure, de la variable nombre (plus il y a de fragments, plus le poids est élevé). Si au contraire la corrélation est faible, il faut alors considérer que la fragmentation s'est produite différemment, à cause de facteurs dépositionnels ou post-dépositionnels, ou du type de taxon* »²⁴. Le retour aux données stratigraphiques doit alors permettre de déterminer si les différences observées sont influencées par les processus post-dépositionnels ou par les activités de production. La perspective n'est pas ici de reconnaître des aléas de sur- et sous-fragmentation des taxons pour pouvoir éventuellement les prendre en compte, mais plutôt de détecter d'éventuels problèmes de conservation différentielle avant de pouvoir, dans un second temps, réfléchir et argumenter sur des questions de sélection et d'usage du bois en relation avec les activités anthropiques.

²⁴ Traduit depuis Piqué, 1999, p. 192.

Dans la pratique, l'ensemble des données (nombre de fragments et poids correspondant par taxon et par échantillon) est rentré dans un tableau qui permet de visualiser le nuage de points et de calculer la pente de la droite qui relie la variable nombre à la variable poids. Un test de Pearson permet de discriminer les individus (taxons ou échantillons) qui se distinguent de la « norme » et un test de Mann-Whitney permet de vérifier que les échantillons proches de la norme appartiennent bien à des populations statistiquement identiques.

Parce qu'il existe effectivement une relation entre taille et poids des fragments, nous pensons que le calcul de cet indice simple ainsi que celui du degré de corrélation entre les deux variables, peuvent être utilisés pour **détecter les aléas de sous- et sur-fragmentation**. Un taxon sous-fragmenté doit normalement présenter une relation déséquilibrée en faveur de la masse, tandis qu'un taxon sur-fragmenté présentera une relation déséquilibrée en faveur du nombre. Parce que nous avons pu montrer, à la suite de Chabal, que la fragmentation des charbons de bois est relativement standardisée, un taxon « normalement » fragmenté devrait être caractérisé par une relation nombre/poids équilibrée. De même, l'écart de l'indice de fragmentation des taxons vis-à-vis de l'indice moyen de fragmentation de l'échantillon peut permettre de détecter les taxons dont la fragmentation s'écarte le plus de la « norme » de l'échantillon.

Toutefois, pour être plus juste, la comparaison de ces indices devrait théoriquement prendre en compte la variation de densité des taxons carbonisés qui, d'après nos résultats, est de l'ordre de 13 à 17% en fonction des conditions de carbonisation. Ceci implique que soient beaucoup mieux connues qu'à l'heure actuelle les valeurs relatives à la masse volumique des bois carbonisés. Étant donné que la masse volumique varie plus entre taxons non carbonisés qu'entre charbons issus d'espèces différentes, l'utilisation des valeurs de densité du bois - en revanche bien établies - n'est pas d'un apport pertinent malgré la relation de proportionnalité mise en évidence entre densités du bois et du charbon (cf. chapitre III).

Le calcul de ces indices sera mis en œuvre prochainement sur du matériel expérimental et archéologique afin d'en tester la validité. S'ils permettent effectivement de mettre en évidence les aléas de sous et sur-fragmentation des taxons, nous envisagerons alors la possibilité de **corriger** leur représentation. Suffit-il de ramener à la moyenne les taxons

s'éloignant de la « norme » de l'échantillon ou faut-il acquérir plus de finesse et comment y parvenir ? Il nous semble que ces premiers éléments constituent une base pour un travail futur offrant des perspectives intéressantes sur le plan méthodologique.

Mais qu'il soit possible ou non de corriger finement le niveau de représentation des taxons dans l'échantillon, détecter de manière simple les aléas de fragmentation permettrait au moins de connaître au moment de l'interprétation les imperfections quantitatives de l'assemblage, leur sens (surreprésentation, sous-représentation) et leur ampleur, précisant d'autant nos possibilités d'interprétation.

- *Choix de la classe de taille à étudier et incidence des distorsions quantitatives sur l'information paléoécologique (et/ou paléontologique)*

Nos données montrent que les différences de fragmentation des taxons s'expriment moins fortement dans la classe >4mm. Inversement, dans la classe de taille [1-2mm], le nombre de fragment est beaucoup plus important pour tous les taxons et ceux qui sont sur-fragmentés s'y trouvent surreprésentés. La classe [2-4mm] est moins variable que la classe précédente, mais plus que la classe supérieure (ce chapitre, § 1.4. et fig. 168).

Ces résultats tendent à montrer que **l'étude de la classe supérieure à 4mm favorise une meilleure représentativité quantitative de l'assemblage**. Cependant, notre travail s'est attaché à documenter les effets des processus post-dépositionnels sur les charbons de bois et la fragmentation induite correspond donc à une seule des étapes de distorsion potentielle de la représentation des taxons. Par ailleurs, la démarche expérimentale implique une standardisation maximale des échantillons, lesquels sont composés dans nos expériences de fragments de charbons de plusieurs taxons représentés à part égale, dont la dimension est la plus homogène possible, provenant de la combustion de branches calibrées, séchées à l'air dans des conditions et selon une durée comparables.

Notre analyse porte donc sur le comportement et la fragmentation différentielle des charbons de bois eux-mêmes ; **ces observations, limitées aux charbons de bois, nous autorisent-elles à tirer des conclusions relatives au dépôt anthracologique ?**

Les données issues des travaux sur la combustion montrent que les taxons produisent des restes en nombre, poids et volume variables. D'après Loreau (1994), les bois peu denses

comme le peuplier donnent des charbons plus gros et plus nombreux que les bois denses comme le chêne. Inversement, d'après Rosen et Olson (1985), les bois peu denses produisent moins de charbons que les bois durs, tandis que d'autres chercheurs montrent que la densité n'est pas la seule variable ayant une influence sur la quantité de restes produits (Théry-Parisot *et al.* 2010 a et b ; Théry-Parisot, 2013). Il existe peu de données concernant la réaction des taxons lorsqu'ils sont brûlés ensemble, toutefois, d'après Loreau (*op. cit.*), les effets des espèces semblent s'annuler mutuellement. La combustion du chêne, plus lente, prolonge par exemple celle du peuplier qui brûle plus complètement et produit de ce fait des restes moins nombreux et moins gros.

La combustion de plusieurs espèces conjointes pourrait donc induire une forme d'homogénéisation du dépôt, mais les données manquent pour l'affirmer et il est clair que d'autres facteurs tels que l'humidité du bois, son calibre, son état phénologique et physiologique, la variation des conditions de combustion (forme de la structure, vent, humidité ambiante, etc.), peuvent également faire varier la physionomie du dépôt initial en termes de nombre et de taille des restes par taxons. Il en résulte que, même à volume de bois brûlé égal par taxon, le nombre de charbons, leur répartition dans les différentes classes de taille et le gabarit des fragments, risquent de varier d'une espèce à l'autre. Or, certaines de nos observations suggèrent par exemple que la **taille initiale des fragments** a une incidence sur la fragmentation. Un « effet volume » sans équivoque n'a pas été mis en évidence (notamment parce que le volume des fragments varie peu dans nos expériences), mais le principe de « **l'effet d'échelle** » est bien connu en mécanique. Plus le volume de matière est important, plus il est susceptible de présenter des zones de faiblesse qui fragilisent sa résistance et favorisent sa rupture. Un fragment plus gros serait donc plus sujet à la fragmentation qu'une particule plus petite. Par ailleurs et en tout état de cause, la **quantité de matière** constituant un solide « entier » ou ce même solide fragmenté est identique ; une plus grande quantité initiale de matière (cf. un charbon plus gros) produit donc une plus grande quantité de matière fragmentée, qui pourra se fragmenter à son tour et ainsi de suite. À taille finale de fragments égale, un volume initial de charbon plus important laisse la possibilité de production d'un nombre plus important de fragments. À nombre final de fragments égal, la rupture d'un volume initial de charbon plus important laisse la possibilité d'un éventail de taille de fragments plus important.

Ainsi la taille des charbons produits à l'issue de la combustion – dont nous avons vu qu'elle peut varier en fonction du taxon, mais également d'une série d'autres facteurs (conditions de carbonisation, calibre et état du bois, etc.) eux-mêmes fluctuants –, risque à terme d'induire des variations de la représentation des taxons dans les différentes classes de taille qui dépendent essentiellement des conditions de formation du dépôt. En définitive, la plus ou moins forte représentation des taxons au sein des différentes classes procède à la fois de la quantité et du calibre du bois initialement brûlé (la combustion de bûches de gros diamètre a plus de chance de produire de gros fragments de charbons ; les très petits ligneux ne peuvent produire que des petits fragments) et de tous les facteurs (conditions de combustion, propriétés intrinsèques de l'essence, etc.) qui influencent la taille des fragments produits par la combustion et donc leur potentiel de refragmentation – en nombre comme en taille –. **Peut-on alors trancher la question de la plus ou moins bonne représentativité des différentes classes de taille ?**

Logiquement, la rupture dans la masse d'un gros fragment (centimétrique ou pluricentimétrique) multiplie les particules qui seront contenues dans la maille supérieure à 4mm, tandis que celles produites par la rupture de plus petits fragments passeront plus facilement dans la classe inférieure. Considérant que le nombre de gros fragments produits par taxon à l'issue de la combustion est relativement aléatoire étant donné le nombre de paramètres influents, il en résulte que, statistiquement, plus un taxon est brûlé, plus ses chances d'être présent sous forme de gros fragments dans le dépôt initial augmentent – ce qui rejoint les conclusions que Chabal tirait de la loi de fragmentation –. Le potentiel de représentation des taxons fréquents dans la classe supérieure à 4mm est dès lors plus élevé, d'autant que les taxons plus rares y sont logiquement moins présents, faisant ainsi varier les fréquences relatives en faveur des premiers. Il est donc probable que les observations archéologiques ayant trait à l'abondance des taxons fréquents dans la classe >4mm (Henry, *ibid.*) par rapport à la classe [2-4mm] soient à interpréter comme une légère surreprésentation de ces derniers (les différences notées dans cette étude sont de l'ordre de 10 à 15% entre les deux classes de taille).

L'étude de la classe supérieure à 4mm minimise donc les distorsions liées aux aléas de sur-fragmentation qui s'expriment bien plus fortement dans les classes inférieures, mais surreprésente sans doute les taxons dominants.

Il n'est pas dit que l'étude de la **classe [2-4mm]** permette systématiquement d'éviter ce biais, même si les observations d'Henry sur le site des Escabasses sont quasi-constantes.

Les taxons dominants le sont dans toutes les classes de taille. Cela s'explique aisément par la loi de fragmentation et se vérifie archéologiquement (Badal-Garcia, 1990 ; Chabal, 1991 ; Henry, 2011). Aussi, si le taxon le plus fréquent est aussi sur-fragmenté, ce biais de surreprésentation risque de persister, voire d'être accentué. Par ailleurs, nos résultats comme ceux de Chabal montrent que le nombre de fragments de petite taille est supérieur à ceux de grande taille pour tous les taxons. Il en résulte que la classe [2-4mm] est souvent numériquement beaucoup plus fournie que la classe >4mm et que l'échantillonnage (et plus encore le sous-échantillonnage) est une pratique plus aléatoire pour la première classe que pour la seconde. Cet aléa constitue un second vecteur de distorsion qui se surajoute aux aléas de fragmentation également amplifiés dans la classe [2-4mm] par rapport à la classe >4mm. Ce second aléa, se surajoutant au premier risque d'entraîner des variations de la représentation des taxons plus importantes et, lorsque des échantillons de plusieurs couches ou structures sont étudiés, les résultats seront moins facilement comparables. Henry, qui a plus particulièrement étudié les variations de représentation du chêne dans ses échantillons, constate que les taux les plus fluctuants sont effectivement issus de l'étude des petits fragments (*ibid.*).

Dans la classe [2-4mm], les fréquences relatives des taxons sont soumises à un risque de distorsions aléatoires plus fort que dans la classe >4mm. La surreprésentation des taxons fréquents y est apparemment moins prononcée sans que ce biais puisse théoriquement être exclu.

Les mêmes causes produisant les mêmes effets, ces risques de distorsions aléatoires sont encore **accentués dans la classe [1-2mm]**.

Dans la pratique quelles conclusions faut-il en tirer ?

Lorsque l'échantillon présente une diversité floristique importante, la surreprésentation des taxons fréquents dans la classe supérieure à 4mm n'induit pas des distorsions de nature à modifier profondément la lecture de l'information paléoenvironnementale. En revanche, si l'échantillon est taxonomiquement pauvre, elle risque de biaiser d'autant plus l'information, déjà partielle, fournie par l'assemblage. Par ailleurs, si des contraintes de temps obligent à

pratiquer un sous-échantillonnage, la probabilité de voir augmenter la liste floristique sera largement réduite du fait de l'abondance du/des taxons majoritaires de l'assemblage.

Dans le cas d'échantillons pauvres, et *a fortiori* sous-échantillonnés, l'analyse exclusive de la fraction supérieure à 4mm ne nous semble pas propice à tirer le maximum du potentiel d'information du matériel étudié ; l'analyse de la classe [2-4mm] permettra l'obtention de résultats moins partiels (nos observations actuelles sur des échantillons issus de contextes historiques, provenant le plus souvent de structures en creux et étudiés dans le cadre de l'archéologie préventive, vont dans ce sens), elle devra être menée parallèlement, voire préférée. Dans les autres cas, la classe supérieure à 4mm semble apporter une information cohérente, interprétable sur le plan paléoécologique et sans doute moins soumise aux aléas propres aux classes inférieures.

L'information fournie par les petits fragments n'est évidemment pas dénuée d'intérêt, là n'est pas notre propos. Lorsque seuls de petits (<4mm) voire très petits fragments (<2mm) sont disponibles à l'étude, ils ne devront pas être négligés, il faudra cependant avoir en tête les limites et les risques de distorsions propres à ce type de matériel. Plus globalement, il nous semble que l'étude des différentes classes de taille de fragments d'un échantillon présente au contraire un intérêt particulier pour la compréhension de l'assemblage. Ainsi que nous l'avons évoqué dans la partie précédente, l'observation de la répartition des fragments d'un taxon au sein des différentes classes de taille (associée à la prise en considération du gabarit des fragments contenus dans la classe >4mm) peut fournir des indices relatifs à la sous- ou sur-fragmentation des essences et permet une plus grande finesse d'analyse. Nous nous joignons en cela aux conclusions d'Henry : « *quantifier les charbons de bois étudiés en prenant en compte leur taille lorsque cela est possible permet de mieux comprendre la variabilité des échantillons archéologiques, mais aussi de déceler des ressemblances ou des divergences entre sites qui permettront in fine, de mieux appréhender à la fois la formation des dépôts anthracologiques et la réalité floristique* » (*ibid.*, p. 42).

Enfin et en guise de conclusion préliminaire, peut-on envisager, au vu de nos résultats et des données préexistantes, l'ampleur des distorsions quantitatives qui peuvent avoir lieu au cours des différentes phases de formation de l'assemblage anthracologique ?

La première concerne l'étape de **collecte du bois**. Les travaux de Théry-Parisot ont remis en cause l'idée que la recherche de propriétés combustibles particulières nécessaires à la conduite d'activités diverses (chauffage, cuisson, fumage, etc.) – dont on ne peut nier qu'elle ait existé depuis les périodes les plus reculées – entraîne forcément une sélection du bois fondée sur l'espèce. Les besoins spécifiques (chaleur vive avec montée rapide en température, combustion lente et durable, production de fumée, etc.) peuvent également être satisfaits par une sélection fondée sur l'état sanitaire, le taux d'humidité ou le calibre des essences (Théry-Parisot, 1998, 2001). Les approches ethno-anthracologiques menées depuis ont confirmé la justesse de cette analyse ; en étudiant le sous-système technique de gestion du bois de feu de populations vivant dans des environnements variés, il a été montré à plusieurs reprises que le choix des espèces est effectivement un critère secondaire de la sélection du combustible (Moutarde, 2006 ; Joly *et al.*, 2009 ; Henry, 2011). Lorsqu'elle a lieu, la sélection taxonomique relève généralement de préférences ou d'interdits culturels et traditionnels, de croyances symboliques, plus que de la meilleure aptitude d'une espèce à satisfaire un besoin énergétique particulier même si des arguments ayant trait à la qualité du bois peuvent être évoqués. En fait, le filtre humain apparaît plutôt comme responsable de potentielles distorsions entre taxons disponibles et taxons collectés (Henry, 2011) qui pourront entraîner ponctuellement une perte d'information d'ordre qualitatif se traduisant dans l'assemblage anthracologique par l'absence d'une ou de quelques rares taxons (les interdits culturels ne peuvent à l'évidence pas concerner une vaste liste d'espèces sans poser quelques problèmes pour l'approvisionnement en bois de la communauté qui y est soumise). Au contraire, la collecte du bois paraît à terme rendre assez bien compte de la composition et la structure des formations végétales traversées et la liste et les fréquences relatives des taxons présents dans l'assemblage anthracologique « *s'établissent bien en fonction des variations réelles de la composition floristique du territoire d'approvisionnement* » (Henry, 2011, p. 260).

En somme donc, l'étape de collecte du bois de feu – lorsque l'échantillon est issu de contextes non spécialisés (foyers domestiques, zones de rejet d'activités multiples) durablement utilisés (par opposition au caractère événementiel d'un échantillon provenant d'un épisode de feu ponctuel) – ne paraît pas induire des distorsions qualitatives et quantitatives « *suffisantes pour que les milieux de collecte du bois ne soient pas perçus par*

l'anthraco-analyse » (Henry, *ibid.*). Il n'en est sans doute pas de même de la **phase de combustion**, processus au cours duquel un nombre important de facteurs non contrôlables peuvent intervenir (type de structure, interactions taxonomiques, conditions ambiantes, etc.). Nous l'avons évoqué, tous les travaux sur la combustion montrent que le nombre de résidus produits varie en fonction des taxons. Reste à savoir si ces variations du taux de restes sont de nature à induire des distorsions d'ampleur suffisantes pour fausser l'analyse. À titre purement illustratif, nous avons calculé à partir des données issues des travaux de Théry *et al.* (2010b), les fréquences relatives théoriques des taxons comme nous l'avons fait plus haut sur nos propres données (ce chapitre, § 1.4.2.). Les valeurs utilisées correspondent au nombre moyen de restes (>2mm) produits par taxon rapporté au volume de bois initial brûlé au cours d'une série de combustions réalisées pour une dizaine d'essences. Le calcul revient donc à considérer que l'ensemble du bois brûlé lors de ces multiples répliques l'a été en un seul épisode et que toutes les espèces y étaient présentes à volume égal. Ces dizaines de milliers de résidus constitueraient donc un dépôt anthracologique étudié intégralement. Dans ce diagramme fictif, les différences de représentation entre le taxon qui produit le moins de résidus et celui qui en produit le plus sont de l'ordre de 11,5 %. Bien sûr, notre extrapolation ne tient aucun compte des potentielles interactions entre taxons lorsqu'ils brûlent effectivement ensemble et ces combustions en conditions contrôlées sont, dans leur mise en œuvre, représentatives d'une situation idéale (sans vent, bois calibré, séchage homogène, etc.). Par ailleurs, notre calcul rapide à partir des valeurs moyennes lisse évidemment l'information, mais il permet de se faire une idée des conséquences induites par la variation de la production de résidus observée entre espèces différentes. Même en admettant une variation deux fois plus importante en conditions non contrôlées (ce qui n'est pas évident étant donné que le nombre de variables incidentes réduit peut-être au contraire l'effet de la variable taxon), la représentation *in fine* des taxons dans l'assemblage anthracologique reste un reflet relativement fidèle de la proportion initiale des espèces brûlées (conclusions auxquelles arrivaient également les auteurs de ces travaux). Notons que des distorsions qualitatives ne semblent pas pouvoir être causées par la phase de combustion : tous les taxons produisent des restes même si leur quantité varie légèrement.

La refragmentation post-dépositionnelle des charbons de bois, constitue dans un troisième temps une nouvelle phase de distorsion potentielle de la représentation des taxons dans

l'assemblage dont nous avons vu qu'elle reste – en termes de fréquences relatives – finalement assez limitée. Les différences de représentation des taxons varient de 10 à 20% selon la classe de taille considérée (§ I.1.2, fig. 168).

Logiquement, il est probable qu'une partie au moins des distorsions quantitatives induites par chaque phase soit réduite par les effets des autres, ce dont semble témoigner la cohérence des résultats anthracologiques comme l'étude de l'état final de fragmentation du matériel de Lattes et du Marduel. Toutefois, on ne peut théoriquement exclure que, ponctuellement, les effets des différentes phases de distorsion de la représentation des taxons s'amplifient mutuellement. D'après nos estimations, ces variations aléatoires ne devraient pas atteindre des valeurs extrêmes.

En définitive, ce sont surtout et en premier lieu **la cohérence et la plus ou moins grande rigueur de l'échantillonnage** qui risquent le plus d'influer sur la représentativité des résultats, en tant qu'il induit une nouvelle source aléatoire de distorsion que rien ne peut plus venir atténuer et qui n'est pas mesurable. Le choix du contexte de prélèvement, sa représentativité spatiale et statistique, son traitement impératif par tamisage ou flottation et une étude du matériel en quantité suffisante tenant compte, si possible, de la taille des fragments, doivent conduire à la meilleure représentativité de l'analyse et une plus grande finesse d'interprétation. À la suite de Chabal, nous insistons donc sur le caractère tout à fait crucial de cet aspect pour la pertinence et la représentativité paléoenvironnementale de l'anthraco-analyse.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre travail s'inscrit dans la continuité des approches méthodologiques que les anthracologues ont eu à cœur de développer dans le but d'apprécier la nature et l'ampleur des biais interprétatifs auxquels pourrait nous exposer notre objet d'étude. L'objectif principal était de comprendre les processus de transformation dépositionnelle et post-dépositionnelle des assemblages et d'évaluer le comportement individuel de taxons soumis à des sollicitations identiques. À ce titre, nos résultats apportent un éclairage nouveau sur le devenir des charbons de bois à l'issue de la phase de combustion. Nous avons pu démontrer en particulier que la refragmentation post-dépositionnelle des charbons de bois, bien qu'étant variable, n'induit pas des distorsions quantitatives de la représentation des taxons de nature à biaiser trop largement leurs proportions initiales dans le dépôt anthracologique. La mise en perspective de nos données avec celles acquises par d'autres chercheurs permet d'évaluer la représentativité des assemblages anthracologiques de façon plus juste.

Parce que la collecte du bois de feu paraît bien refléter les variations réelles de la composition floristique du territoire d'approvisionnement et parce que la phase de combustion comme la refragmentation post-dépositionnelle ne paraissent pas induire des distorsions majeures de la représentation des taxons dans l'assemblage anthracologique, la pertinence de l'anthracologie pour la reconstitution des paléo-végétations et sa vocation paléoenvironnementale peuvent être réaffirmées sur des bases plus solides. Une fois assurés du fait que la composition qualitative et quantitative des spectres anthracologiques tels que nous les étudions reflètent bien l'image du territoire d'approvisionnement en bois, l'aptitude de l'anthracologie à participer de la compréhension plus générale de l'organisation et du mode de vie des groupes humains que l'on étudie, se voit également renforcée.

Toutefois, le potentiel informatif et cette double vocation de l'anthracologie ne sont garantis qu'à la condition du respect des bonnes conditions d'acquisition et d'étude de l'échantillon. À la suite de nos prédécesseurs, nous insistons sur l'importance fondamentale des phases de prélèvement, de traitement, éventuellement de sous-échantillonnage, et d'analyse du matériel. Celles-ci doivent être envisagées dans l'objectif de répondre aux problématiques

fixées, mais également dans le respect rigoureux des impératifs méthodologiques de la discipline, lequel doit être sous-tendu par une bonne connaissance des mécanismes de formation des assemblages anthracologiques. Le protocole de prélèvement sur le terrain doit être pensé en fonction de ces deux objectifs, tout en s'articulant correctement avec les exigences des autres disciplines. Par ailleurs, le sous-échantillonnage et l'étude du matériel, au-delà de la nécessité d'atteindre une bonne représentativité statistique, gagneront en qualité s'ils tiennent compte de la taille des fragments. Nous avons pu mettre en évidence que l'information n'est pas strictement identique selon que l'on étudie les fragments inférieurs ou supérieurs à 4mm. En fonction des caractéristiques de l'échantillon et du temps disponible, l'étude de l'une ou l'autre de ces classes est recommandée. Dans l'idéal cependant, l'étude de chaque classe de taille séparément est préférable dans la mesure où la prise en compte et le croisement des résultats des différentes mailles, en plus d'apporter des informations complémentaires sur le plan paléoenvironnemental, sont susceptibles de nous renseigner sur la formation et les caractéristiques propres de l'assemblage anthracologique que l'on étudie et, en particulier, sur d'éventuelles sur- et sous-fragmentation des taxons. Car même si la variabilité taxonomique mise en évidence ne présente pas un caractère rédhibitoire pour la pertinence de l'analyse, il n'en reste pas moins souhaitable de pouvoir identifier, mesurer et corriger la part de représentation des taxons dans l'assemblage qui relève de l'aléa. Or, l'un des apports de notre travail est d'avoir pu montrer que la variation taxonomique de la fragmentation des charbons de bois s'exprime au niveau générique, spécifique et plus ponctuellement intra-spécifique. La variation intra-genre de la fragmentation en particulier rend difficilement atteignable l'objectif de mise sur pied d'indices correctifs fixes de la représentation des taxons à l'échelle où nous sommes capables de les identifier par l'observation microscopique. Il s'en suit que c'est à l'intérieur même de l'échantillon étudié qu'il faut tâcher d'identifier les éventuelles distorsions quantitatives, propres à chaque échantillon. Quelques outils théoriques de détection et d'évaluation de l'ampleur des sur- et sous-fragmentation des taxons, dont la validité doit encore être éprouvée, sont proposés en ce sens. Ces observations ne sous-entendent en aucune manière qu'une recherche qui s'attacherait à mieux caractériser les propriétés et le comportement à la fragmentation des charbons de bois à l'échelle taxonomique soit vaine car i) nous ne prétendons pas que nos résultats soient définitifs, ii)

en tout état de cause, mieux nous connaissons les mécanismes et les paramètres qui conditionnent la variation de la fragmentation, plus nous serons à même d'affiner notre appréhension de la formation de chaque assemblage et donc nos interprétations. Certaines observations montrent notamment que l'anatomie des essences et leurs propriétés physiques ont une influence sur l'intensité de leur fragmentation, sans qu'elles suffisent à expliquer l'ensemble de la variation observée. En fonction de la nature des processus subis par le matériel, des propriétés telles que la masse volumique par exemple renforcent ou au contraire limitent le processus de fragmentation. Il en ressort que les taxons peuvent avoir un comportement différent d'un site à l'autre en relation avec les processus dominants qui participent de la formation des dépôts archéologiques. De ce point de vue, la bonne connaissance de l'histoire taphonomique du site étudié s'avère essentielle et la compréhension de la formation de l'assemblage anthracologique comme son interprétation s'enrichiront fortement des apports des analyses géomorphologiques et micromorphologiques dont nous ne pouvons que réclamer la systématisation et la précision, en particulier dans les gisements préhistoriques.

À une autre échelle, l'étude expérimentale de l'impact des processus post-dépositionnels que nous avons menée montre l'effet particulièrement néfaste de la météorisation sur les charbons de bois, surtout lorsque les variations de températures sont importantes. Les contextes périglaciaires sont, de ce point de vue, extrêmement peu propices à leur conservation. En raison de l'atténuation des processus météoriques et de la plus grande stabilité thermique qui réduit l'expression des processus périglaciaires à l'intérieur des grottes, le dépôt en cavité ralentit fortement l'endommagement du matériau, perçu au contraire très rapidement en plein air. Dans ce type de contexte, le piétinement du matériel avant son recouvrement, dont nous avons pu montrer qu'il est hautement destructeur pour les charbons de bois, peut être envisagé comme un processus récurrent qui doit être recherché si l'on souhaite expliquer la mauvaise conservation du dépôt anthracologique. Dans les deux cas – météorisation et piétinement –, l'enfouissement rapide du matériel est le premier garant de la conservation du dépôt. Le recouvrement des charbons de bois par 10 à 15cm de sédiment, annule presque entièrement les effets du piétinement, tandis que l'enfouissement à 5cm de profondeur en plein air en contexte périglaciaire assure une préservation du dépôt notablement augmentée (sur les quelques

années qu'ont duré nos observations). Une fois enfouis, le gonflement cryogénique et les alternances d'imbibition-dessiccation du sédiment sont en mesure d'affecter encore les charbons de bois, mais moins fortement ou surtout, moins rapidement que les processus précédemment évoqués. Les pressions sédimentaires que génèrent les alternances gel-dégel paraissent toutefois plus dommageables pour le matériau que les retraits et gonflements du sédiment provoqués par la seule variation des conditions hydriques du milieu. Enfin, la seule immersion des fragments dans l'eau, même lorsque le pH du milieu est élevé ou que les charbons subissent des phases de séchage et d'imbibition en alternance, ne produit que peu d'effet sur le matériau (sur la durée et l'échelle d'observation qui est la nôtre).

Nos résultats montrent que l'exposition des charbons de bois à des processus subis ou répétés pendant trois à quatre ans seulement suffit à entraîner une importante altération du matériel, laquelle se traduit principalement par sa fragmentation. Il ne nous est pas possible d'assurer qu'une transformation ou dégradation de la matière ne se produit pas à une autre échelle, mais l'absence systématique de perte de masse volumique constitue toutefois un bon indice de la bonne conservation structurelle du matériau. De nouvelles mises en œuvre expérimentales ou l'observation du matériel issu du présent travail à une autre échelle d'analyse permettront éventuellement à l'avenir de vérifier la plus ou moins bonne préservation des charbons de bois aux niveaux moléculaires et structurels. En attendant, au vu des seuls résultats acquis – soit de la rapidité et l'intensité des effets ressentis sur les dépôts dans leur ensemble comme sur les charbons de bois eux-mêmes – il ne semble pas surprenant que nombre de gisements, en particulier préhistoriques, soient exempts de charbons macroscopiques. La bonne préservation du matériel anthracologique dans les sites anciens signe donc éventuellement l'importance des activités liées au feu qui s'y sont déroulées, mais témoigne surtout à notre avis d'une vitesse de recouvrement des vestiges suffisamment rapide pour avoir protégé le matériel anthracologique du processus de fragmentation qui le voue à disparition.

Afin de prolonger, incrémenter et affiner les résultats acquis, un « retour au terrain » et au matériel archéologique s'impose. Dans la suite logique de notre travail, il s'agira désormais de i) tester les outils de détection et d'évaluation des aléas de fragmentation des taxons, ii) rechercher d'éventuelles différences spatiales de conservation et de fragmentation du matériel et des taxons en fonction des processus post-dépositionnels identifiés à l'échelle du

site, iii) évaluer si des « signaux de fragmentation » caractéristiques de certains processus peuvent être mis en évidence. Ces différentes observations devraient nous permettre i) d'affiner nos interprétations environnementales, ii) de pouvoir mettre en perspective les résultats de l'analyse taphonomique du matériel anthracologique avec d'autres interrogations relatives aux activités anthropiques liées au feu.

La mise en place d'un protocole de fouille et de prélèvement du matériel anthracologique adapté, une réelle interaction pluridisciplinaire une analyse taphonomique précise du site sont les conditions indispensables à la réalisation d'un travail de ce type. Celles-ci étant réunies, l'étude du matériel de la Grotte Bouyssonie (Brive la Gaillarde, Corrèze, France ; dir. D. Pesesse), au-delà du magnifique potentiel de reconstitution paléoenvironnementale que laissent entrevoir nos résultats préliminaires sur cette séquence longue d'environ 32000 ans dont tous les niveaux contiennent des charbons en quantité, nous offrira prochainement cette occasion.

BIBLIOGRAPHIE :

- AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ÉNERGIE, (2001). Mesure des caractéristiques des combustibles du bois. Ademe, Critt Bois, Fibois, CTBA. Juillet 2001, 24p.
- AGSOUS, S., (2008). *Stratigraphie et sédimentologie de l'abri Pataud (Les Eyzies de Tayac, Dordogne, France). Contribution à l'étude des paléoenvironnements des cultures du Paléolithique supérieur ancien du Périgord*. Thèse de doctorat, Muséum national d'histoire naturelle, Paris, 241 p.
- AGSOUS, S., LENOBLE, A., NESPOULET, R., (2006). L'abri Pataud. In : TEXIER J.-P. (dir.), *Sédimentogenèse des sites classiques du Périgord*. Livret-guide de l'excursion de l'Association française de sédimentologie, édition numérique 2006, p. 31-43.
- ALBERT, R.-M., LAVI, O., ESTROFF, L., WEINER, S., TSATSKIN, A., RONEN, A., LEV-YADUN, S., (1999). Mode of Occupation of Tabun Cave, Mt Carmel, Israel, during the Mousterian Period: A Study of the Sediments and Phytoliths. *Journal of Archaeological Science*, vol. 26 (10), p. 1249-1260.
- ALBERT, R.-M., WEINER, S., BAR-YOSEF, O., MEIGNEN, L., (2000). Phytoliths in the Middle Palaeolithic Deposits of Kebara Cave, Mt Carmel, Israel: Study of the Plant Materials used for Fuel and Other Purposes. *Journal of Archaeological Science*, vol. 27 (10), p. 931-947.
- ALBERT, R.-M., WEINER, S., MEIGNEN, L., BAR-YOSEF, O., (2003). Quantitative phytolith study of hearths from the Natufian and Middle Palaeolithic levels of Hayonim Cave (Galilee, Israel). *Journal of Archaeological science*, vol. 30 (4), p. 461-480.
- ALBERT, R.-M., BAMFORD, M. K., CABANES, D., (2006). Taphonomy of phytoliths and macroplants in different soils from Olduvai Gorge (Tanzania) and the application to Plio-Pleistocene palaeoanthropological samples. *Quaternary International*, vol. 148 (1), p. 78-94.
- ALBERT, R.-M., BERNA, F., GOLDBERG, P., (2012). Insights on Neanderthal fire use at Kebara Cave (Israel) through high resolution study of prehistoric combustion features: Evidence from phytoliths and thin sections. *Quaternary International*, vol. 247, p. 1-9.
- ALIX, C., (1998). Provenance et circulation des bois en milieu arctique : quels choix pour les Thuléens ? *Revue d'Archéométrie*, vol. 22, p. 11-22.
- ALIX, C., (2001). *Exploitation du bois par les populations néo-eskimo entre le nord de l'Alaska et le Haut Arctique canadien*. Thèse de doctorat, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, Paris, 434 p.
- ALIX, C., BREWSTER, K., (2005). Not all driftwood is created equal: wood use and value along the Yukon and Kuskowim Rivers, Alaska. *Alaska Journal of Anthropology*, vol. 2 (1), p. 2-19.
- ALLEN, J. R. M., HUNTLEY, B., (2000). Weichselian palynological records from southern Europe: correlation and chronology. *Quaternary International*, vol. 73/74, p.111-125.
- ALPERSON-AFIL, N., (2008). Continual fire-making by Hominins at Gesher Benot Ya'aqov, Israel. *Quaternary Science Reviews*, vol. 27, p. 1733-1739.

- ALPERSON-AFIL, N., GOREN-INBAR, N., (2012). Out of Africa and into Eurasia with controlled use of fire: Evidence from Gesher Benot Ya'aqov, Israel. *Archaeology Ethnology and Anthropology of Eurasia*, vol. 28 (1), p. 63-78.
- ANTAL, M. J., GRØNLI, M., (2003). The art, science and technology of charcoal production. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 42, p. 1619-1640.
- ARMOUR-CHELU, M., ANDREWS, P., (1994). Some effects of bioturbation by earthworms (Oligochaeta) on archaeological sites. *Journal of Archaeological Science*, vol. 21, p. 433-443.
- ARNAL, H., (1971a). Les sols polygonaux étirés et sols striés d'âge würmien de Landun (Gard). *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, vol. 8 (8-3), p. 151-160.
- ARNAL, H., (1971b). Phénomènes périglaciaires dans la basse vallée du Rhône. Formations quaternaires du rebord sud et alluvions du fond de l'étang de Pujaut. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, vol. 8 (8-3), p. 145-149.
- ASCOUGH, P. L., BIRD, M. I., SCOTT, A. C., COLLINSON, M. E., COHEN-OFRI, I., SNAPE, C. E., LE MANQUAIS, K., (2010). Charcoal reflectance measurements: implications for structural characterization and assessment of diagenetic alteration. *Journal of Archaeological Science*, vol. 37 (7), p. 1590-1599.
- ASCOUGH, P. L., BIRD, M. I., FRANCIS, S. M., LEBL, T., (2011a). Alkali extraction of archaeological and geological charcoal: evidence for diagenetic degradation and formation of humic acids. *Journal of Archaeological Science*, vol. 38 (1), p. 69-78.
- ASCOUGH, P. L., BIRD, M. I., FRANCIS, S. M., THORNTON, B., MIDWOOD, A. J., SCOTT, A. C., APPERLEY, D., (2011b). Variability in oxidative degradation of charcoal: Influence of production conditions and environmental exposure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 75 (9), p. 2361-2378.
- ASHTON, N. M., COOK, J., LEWIS, S. G., ROSE, J., (Eds.), (1992). *High Lodge: Excavations by G. Sieveking 1962-68 and J. Cook 1988*. Londres, British Museum Press, 192 p.
- ASOUTI, E., AUSTIN, P., (2005). Reconstructing woodland vegetation and its exploitation by past societies, based on the analysis and interpretation of archaeological wood charcoal macrofossils. *Environmental Archaeology*, vol. 10, p. 1-18.
- AVAT, F., (1993). *Contribution à l'étude des traitements thermiques du bois jusqu'à 300°C : transformations chimiques et caractérisations physico-chimiques*. École Nationale Supérieure des Mines de Saint Étienne, Saint-Étienne, 240 p.
- BACHELARD, G., (1949). *La psychanalyse du feu*. Paris, Éditions Gallimard, 1992, 192 p.
- BADAL, E., (1988). La antracología: Método de recogida y estudio del carbón prehistórico, *SAGVNTVM*, vol. 21, p. 169-182.
- BADAL GARCIA, E., (1990a). *Aportaciones de la anthracología al estudio del paisaje vegetal y su evolución en el cuaternario reciente, en la costa mediterránea del País Valenciano y Andalucía (18000-3000 BP)*. Thèse de doctorat, Université de Valencia, 521 p.
- BADAL GARCIA, E., (1990b). Méthode de prélèvement et paléoécologie du Néolithique d'après les charbons de bois de "La Cova de les Cendres" (Alicante, Espagne). In : T. Hackens, A.V.

Munaut and C. Till (Eds), *Wood and Archaeology, Bois et archéologie*, First European Conference, Louvain-la-Neuve, October 2nd-3rd 1987, *Pact*, vol. 22., p. 231-243.

- BADAL-GARCIA, E., (1992). L'antracologie préhistorique: à propos de certains problèmes méthodologiques. In: J.L. VERNET (Ed.), *Actes du colloque : Les charbons de bois les anciens écosystèmes et le rôle de l'Homme*, Montpellier, 10-13 septembre 1991, *Bulletin de la Société Botanique de France*, vol. 139 (2-3-4), p. 167-189.
- BARBETTI, M., (1986). Traces of fire in the archaeological record before one million years ago. *Journal of Human Evolution*, vol. 15, p. 771-781.
- BAR-YOSEF, O., VANDERMEERSCH, B., ARENSBURG, B., BELFER-COHEN, A., GOLDBERG, P., LAVILLE H., MEIGNEN, L., RAK, Y., SPETH, J.-D., TCHERNOV, E., TILLIER, A.-M., WEINER, S., (1992). The excavations in Kebara Cave, Mont Carmel. *Current Anthropology*, vol. 33, p. 497-550.
- BAR-YOSEF, O., MEIGNEN, L., (2007). *Kebara Cave, Mt Carmel, Israel : The Middle and Upper Paleolithic Archaeology*. Part I, Cambridge, USA : American School of Prehistoric Research, Peabody Museum, Harvard University, 1 vol., 288 p.
- BASTIN, A., CAILLEUX, A., (1941). Action du vent et du gel au Quaternaire dans la région bordelaise. *Bulletin de la Société géologique de France*, vol. 11 (7-9), p. 259-266.
- BAZILE-ROBERT, E., (1979). Flore et végétation du sud de la France pendant la dernière glaciation d'après l'analyse anthracologique. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 154 p.
- BAZILE-ROBERT, E., ROIRON, P., VERNET, J.-L., (1981). *Les macrorestes végétaux du Pléistocène et du Quaternaire méditerranéen (feuille et bois carbonisés), leur signification en Paléoécologie*. Actes du 106^e Congrès National des Sociétés Savantes, Sect. Science, Perpignan 14-18 avril 1981, vol. I, p. 75-84.
- BAZILE-ROBERT, E., (1982). Données expérimentales pour l'antraco-analyse. *Études Quaternaires Languedociennes*, vol. 2, p. 25-32.
- BEAUDOUIN, C., SUC, J.-P., ACHERKI, N., COURTOIS, L., RABINEAU, M., ALOÏSI, J.-C., SIERRA, F. J., OBERLIN, C., (2005). Palynology of the northwestern Mediterranean shelf (Gulf of Lions): First vegetational record for the last climatic cycle. *Marine and Petroleum Geology*, vol. 22 (6-7), p. 845-863.
- BEAUDOUIN, C., JOUET, G., SUC, J.-P., BERNÉ, S., ESCARGUEL, G., (2007). Vegetation dynamics in southern France during the last 30 ky BP in the light of marine palynology. *Quaternary Science Reviews*, vol. 26 (7-8), p. 1037-1054.
- BEHRENSMEYER, A. K., (1978). Taphonomic and Ecologic Information from Bone Weathering. *Paleobiology*, vol. 4, p. 150-162.
- BEHRENSMEYER, A. K., (1983). Patterns of Natural Bone Distribution on Recent Land Surfaces : Implications for Archaeological Site Formation. In: J. CLUTTON-BROCK, C. GRIGSON (dir.), *Animal and Archaeology*, t. I, Hunters and their Prey. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Reports, International Series 163, p. 93-106.

- BEHRENSMEYER, A. K., HILL, A. P., (dir.), (1980). *Fossils in the Making : Vertebrate Taphonomy and Paleocology*. Chicago, University of Chicago Press (Prehistoric Archeology Ecology), 338 p.
- BEHRENSMEYER, A. K., GORDON, K. D., YANAGI, G. T., (1986). Trampling as a cause of bone surface damage and pseudo-cutmarks. *Nature*, vol. 319, p. 768-771.
- BELCHER, C. M., COLLINSON, M. E., SCOTT, A. C., (2005). Constraints on the thermal energy released from the Chicxulub impactor: new evidence from multi-method charcoal analysis. *Journal of the Geological Society of London*, vol. 162, p. 591-602.
- BERGER, J.-F., (1996). *Le cadre paléogéographique des occupations du Bassin du Valdainais (Drôme) à l'Holocène*. Thèse de doctorat, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, 324 p.
- BERTRAN, P., TEXIER, J.-P., (1999). Facies and microfacies of slope deposits. *Catena*, vol. 35 (2-4), p. 99-121.
- BERTRAN, P., LENOBLE, A., (2002). Fabriques des niveaux archéologiques : méthode et premier bilan des apports à l'étude taphonomique des sites paléolithiques, *Paléo*, vol. 14, p. 13-28.
- BERTRAN, P., BEAUVAL, C., COSTAMAGNO, S., FERRIER, C., KERVAZO, B., LACRAMPE, F., LAROULANDIE, V., LENOBLE, A., MOURRE, V., ONEZIME, O., O'YL, W., THIÉBAUT, C., (2003). *Le programme d'études taphonomiques dans un porche de grotte en contexte périglaciaire actuel*. Rapport d'activité 2003.
- BERTRAN, P., BARRÉ, A., BEAUVAL, C., BOULOGNE, S., BRENET, M., BRUXELLES, L., CLAUD, E., COSTAMAGNO, S., FERRIER, C., JARRY, M., KERVAZO, B., LACRAMPE, F., LAROULANDIE, V., LENOBLE, A., MALLYE, J.-B., MOURRE, V., ONEZIME, O., O'YL, W., THIÉBAUT, C., (2004). *Programme d'études taphonomiques en contexte périglaciaire actuel*. Rapport d'activité 2004.
- BERTRAN, P., LENOBLE, A., LACRAMPE, F., BRENET, M., CRETIN, C., MILOR, F., (2005). Le site aurignacien de plein-air de Combemenu à Brignac-la-Plaine (Corrèze) : apport de la géoarchéologie et de l'étude de l'industrie lithique à la compréhension des processus taphonomiques. *Paléo*, vol. 17, p. 7-30.
- BERTRAN, P., FABRE, R., (2005). Stratigraphie du site des Peyrugues (Lot), une coupe de référence pour le dernier Pléniglaciaire en Aquitaine. *Quaternaire*, vol. 16 (1), p. 25-44.
- BERTRAN, P., BEAUVAL, C., BOULOGNE, S., BRENET, M., CLAUD, E., COSTAMAGNO, S., FERRIER, C., KERVAZO, B., LACRAMPE, F., LAROULANDIE, V., LENOBLE, A., MALLYE, J.-B., MASSON, B., MOURRE, V., ONEZIME, O., O'YL, W., THIÉBAUT, C., VALLIN, L., (2005). *Programme d'études taphonomiques en contexte périglaciaire actuel*. Rapport d'activité 2005.
- BERTRAN, P., BEAUVAL, C., BERROUET, F., BOULOGNE, S., BRENET, M., CHRZAVZEZ, J., LAROULANDIE, V., MALAURENT, P., MALLYE, J.-B., PASTY, S., SASIAS, M., SIN, P., TEXIER, J.-P., (2006). *Dynamique des abris sous roche et des porches de grottes en contexte périglaciaire*. *Études taphonomiques*. Rapport d'activité 2006.
- BERTRAN, P., BORDES, J.-G., BARRE, A., LENOBLE, A., MOURRE, V., (2006) - Fabrique d'amas de débitage : données expérimentales. *Bulletin de la Société préhistorique française*, vol. 103 (1), p. 33-47.

- BERTRAN, P., BEAUVAL, C., BOULOGNE, S., BRENET, M., CHRZAVZEZ, J., CLAUD, E., COSTAMAGNO, S., LAROULANDIE, V., LENOBLE, A., MALAURENT, P., MASSON, B., MALLYE, J.-B., SIN, P., THIÉBAUT, C., VALLIN, L., (2009a). Dynamique sédimentaire et taphonomie des abris sous roche et des porches de grotte en milieu périglaciaire. Le programme Gavarnie. *Les Nouvelles de l'Archéologie*, vol. 118, p. 11-16.
- BERTRAN, P., ALLENET, G., GÉ, T., NAUGHTON, F., POIRIER, P., SANCHEZ GONI, M.-F. (2009b). Coversand and Pleistocene palaeosols in the Landes region, southwestern France. *Journal of Quaternary Science*, vol. 24 (3), p. 259-269.
- BERTRAN, P., KLARIC, L., LENOBLE, A., MASSON, B., VALLIN, L., (2010). The impact of periglacial processes on Palaeolithic sites: The case of sorted patterned grounds. *Quaternary International*, vol. 214 (1-2), p. 17-29.
- BERTRAN, P., ANTOINE, P., LEGENTIL, C., LENOBLE, A., MOINE, O., LUCA, S., (2012). Distribution et chronologie du Pergélisol en France au Pléistocène supérieur: base de données et premiers résultats. Communication présentée au colloque Q8 « *Variabilité spatiale des environnements quaternaires contraintes, échelles et temporalités* », Clermont-Ferrand, 29 février-2 mars 2012.
Disponible sur : <http://videocampus.univ-bpclermont.fr/?v=ldqnrkrjvcevwldjufmqu>
- BILBAO, R., MILLERA, A., ARAUZO, J., (1989). Kinetics of weight loss by thermal decomposition of xylan and lignin. Influence of experimental conditions. *Thermochimica Acta*, vol. 143, p. 137-148.
- BINFORD, L.R., (1981). *Bones, Ancient Men and Modern Myths*. New York : Academic Press (Studies in Archaeology), 320 p.
- BINFORD, L. R., HO, C. K., (1985). Taphonomy at a Distance: Zhoukoudian, "The Cave Home of Beijing Man"? [and Comments and Reply], *Current Anthropology*, vol. 26 (4), p. 413-442.
- BLACKFORD, J. J., (2000). Charcoal fragments in surface samples following a fire and the implications for interpretation of subfossil charcoal data. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, vol. 164 (1-4), p. 33-42.
- BODU, P., (1990). L'application de la méthode des remontages à l'étude du matériel lithique des premiers niveaux châtelperroniens d'Arcy-sur-Cure. In : C. FARIZY (dir.), *Paléolithique moyen récent et Paléolithique supérieur ancien en Europe*, actes du colloque international de Nemours. Mémoire n°3, Musée de Préhistoire d'Ile-de-France, p. 309-312.
- BORDES, J.-G., (2002). *Les interstratifications Châtelperronien/Aurignacien du Roc de Combe et du Piage (Lot, France): analyse taphonomique des industries lithiques, implications archéologiques*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 365 p.
- BORREGA, M., KÄRENLAMPI, P. P., (2008). Mechanical behavior of heat-treated spruce (*Picea abies*) wood at constant moisture content and ambient humidity. *Holz Roh Werkst*, vol. 66. P. 63-69.
- BOST, M., (2008). *Altération par le gel des massifs rocheux : Étude expérimentale et modélisation des mécanismes de génération des contraintes dans les fissures*. Thèse de doctorat, Paristech, 281 p.

- BOUTEYRE, C., ALLEMANN, M., (1964). Sur quelques phénomènes périglaciaires en Costières du Gard. Un réseau polygonal de fentes en coin. *Extrait du Bulletin de la Société d'Études des Sciences Naturelles de Nîmes*, vol. 50, p. 3-15.
- BRAADBAART, F., BOON, J. J., VAN DER HORST, J., VAN BERGEN, P. F., (2004). Laboratory simulations of the transformation of peas as a result of heating: the change of the molecular composition by DTMS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 71 (2), p. 997-1026.
- BRAADBAART, F., POOLE, I., (2008). Morphological, chemical and physical changes during charcoalification of wood and its relevance to archaeological contexts. *Journal of Archaeological Science*, vol. 35 (9), p. 2434-2445.
- BRAADBAART, F., POOLE, I., VAN BRUSSEL, A. A., (2009). Preservation potential of charcoal in alkaline environments: an experimental approach and implications for the archaeological record. *Journal of Archaeological Science*, vol. 36, p. 1672-1679.
- BRAIN, C. K., (1969). The contribution of Namib Desert Hottentots to an understanding of Australopithecine bone accumulations. *Scientific Papers of the Namib Desert Research Station*, vol. 32, p. 1-7.
- BRAIN, C. K., (1981). *The Hunters or the Hunted ? An Introduction to African Cave Taphonomy*. Chicago, Chicago University Press, 365 p.
- BRAIN, C. K., SILLEN, A., (1988). Evidence from the Swartkrans Cave of the earliest use of fire, *Nature*, vol. 336, p. 464-466.
- BROCHIER, J. É., (1996). Feuilles ou fumier ? Observations sur le rôle des poussières sphérolithiques dans l'interprétation des dépôts archéologiques holocènes. *Anthropozoologica*, vol. 24, p. 19-30.
- BROCHIER, J. É., (2002). Les sédiments anthropiques. Méthodes d'étude et perspectives. In : J.-C., MISKOVSKY (dir.), *Géologie de la Préhistoire : méthodes, techniques, applications*. GEOPRE éditions., Paris, p. 453-477.
- BRUGAL, J.-P., FOSSE, P., (2004). Carnivores et Hommes au Quaternaire en Europe de l'Ouest. (Actes du Symposium 3.3, UISPP Liège 2001, J.P.BRUGAL et P. FOSSE (org.)). *Revue de Paléobiologie, Genève*, 23(2), p. 575-595.
- BRUGAL, J.-P., FOSSE, P., GUADELLI, J.-L., (1997). Comparative study of bone assemblages made by recent and Plio-pleistocene Hyaenids (*Hyaena*, *Crocuta*). In : L. ADRIEN HANNUS, LYNETTE ROSSUM, R. PETER WINHAM (Eds.), *Proceedings of 1993 Bone Modification Conference, The Eighth International Meeting of Working Group 1 on Bone Modification (resp. M. Patou-Mathis)*. Hot Springs, South Dakota, USA, Occasional Publication N°1, Archeology Laboratory, Augustana College, Sioux Falls, SD, p.158-187.
- BYRNE, C. E., NAGLE, D. C., (1997). Carbonization of wood for advanced materials applications, *Carbon*, vol. 35, p. 259-266.
- CABANES, D., WEINER, S., SHAHACK-GROSS, R., (2011). Stability of phytoliths in the archaeological record: a dissolution study of modern and fossil phytoliths. *Journal of Archaeological Science*, vol. 38 (9), p. 2480-2490.

- CAHEN, D., KARLIN, C., KEELEY, L.-H., VAN NOTEN, F., (1980). Méthodes d'analyse technique, spatiale et fonctionnelle d'ensembles lithiques, *Helinium*, vol. 20, p. 209-259.
- CAILLEUX, A., ROUSSET, C., (1968). Présence de réseaux polygonaux de fentes en coin en Basse-Provence occidentale et leur signification paléoclimatique. *Comptes Rendus de l'Académie des sciences de Paris*, vol. 266, p. 669-671.
- CAMPBELL, I. D., (1999). Quaternary pollen taphonomy: examples of differential redeposition and differential preservation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 149, p. 245-256.
- CAMPETTI, S., D'ERRICO, F., GIACOBINI, G., RADMILLI, A. M., (1989). Taphonomie, industrie osseuse et pseudoinstruments en os dans le site du Paléolithique inférieur de Castel di Guido (Rome). In : *Outillage peu élaboré en os et en bois de cervidés*, t. III . Treignes : Éditions du Centre d'études et de documentation archéologiques, Artefacts, vol. 7, p. 21-23.
- CANTI, M. G., (2003). Earthworm activity and archaeological stratigraphy: a review of products and processes. *Journal of Archaeological Science*, vol. 30, p. 135-148.
- CARBONELL, E., GIRALT, S., VAQUERO, M., (1994). Abric Romani (Capellades, Barcelone, Espagne) : une importante séquence anthropisée du Pléistocène supérieur. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, vol. 91, p. 47-55.
- CARCAILLET, C., (2001). Soil particles reworking evidences by AMS 14C dating of charcoal. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, vol. 332, p. 21-28.
- CARCAILLET, C., TALON, B., (1996). Stratigraphie et datations de charbons de bois dans les Alpes : quelques aspects taphonomiques. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 50, p. 233-244.
- CARUSO FERMÉ, L., THÉRY-PARISOT, I., (2011). Experimentation and combustion properties of Patagonian Andean wood. *SAGVNTVM EXTRA*, vol. 11, p. 39-40.
- CASPAR, J.-P., MASSON, B., VALLIN, L., (2009). Taphonomie des ensembles lithiques du Paléolithique moyen en contexte loessique: L'approche expérimentale. *Les Nouvelles de l'Archéologie*, vol. 118, p. 21-26.
- CHABAL, L., (1982). *Méthodes de prélèvement des bois carbonisés protohistoriques pour l'étude des relations homme-végétation*, D.E.A. USTL, Montpellier, 54 p.
- CHABAL, L., (1988). Pourquoi et comment prélever les charbons de bois pour la période antique : les méthodes utilisées sur le site de Lattes (Hérault), *Lattara*, vol. 1, p. 187-222.
- CHABAL, L., (1989). Perspectives anthracologiques sur le site de Lattes (Hérault), *Lattara*, vol. 2, p. 53-72.
- CHABAL, L., (1990). L'étude paléo-écologique de sites protohistoriques à partir des charbons de bois : la question de l'unité de mesure. Dénombrement de fragments ou pesées ? In : T. HACKENS, A.V. MUNAUT AND CL. TILL (Ed.), *Wood and Archaeology. Bois et archéologie. First European Conference, Louvain-la-Neuve, October 2nd-3rd 1987, PACT, 22, Belgique*, p. 189-205.

- CHABAL, L., (1991). *L'Homme et l'évolution de la végétation méditerranéenne, des âges des métaux à la période romaine : recherches anthracologiques théoriques, appliquées principalement à des sites du Bas-Languedoc*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II. 435 p.
- CHABAL, L., (1992). Représentativité paléo-écologique des charbons de bois archéologiques issus du bois de feu. In: J.L. VERNET (Ed.), *Actes du colloque : Les charbons de bois les anciens écosystèmes et le rôle de l'Homme*, Montpellier, 10-13 septembre 1991, Bulletin de la Société Botanique de France, vol. 139 (2-3-4), p. 213-236.
- CHABAL, L., (1994). Apports de l'anthracologie à la connaissance des paysages passés : performances et limites, *Histoire et Mesure*, vol. 9 (3-4), p. 317-338.
- CHABAL, L., (1997). *Forêts et sociétés en Languedoc (Néolithique final, Antiquité tardive. L'anthracologie, méthode et paléoécologie*. Documents d'Archéologie Française, n°63, Éditions de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris, 192 p.
- CHRZAVZEZ, J., (2006). *La collecte du bois de feu au Paléolithique, Apport méthodologique et étude de cas: la grotte de Fumane dans les Pré-Alpes italiennes*. Master II Environnement et Archéologie, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, 76 p.
- CHRZAVZEZ, J., HENRY, A., THÉRY-PARISOT, I., (2011). Identificando estrategias de adquisición del combustible leñoso en antracología: puede contribuir la experimentación a determinar el calibre de los carbones en contexto arqueológico? In : A. MORGADO, J. BAENA, D. GARCIA (Eds.), *La investigación experimental aplicada a la arqueología*. Actas del II^{do} Congreso Internacional de arqueología experimental, 26-28 noviembre 2008, Ronda, España, p. 205-211.
- CLARK, J. S., (1988). Particle motion and the theory of charcoal analysis: Source area, transport, deposition, and sampling. *Quaternary Research*, vol. 30 (1), p. 67-80.
- CLARK, J. D., HARRIS, J. W. K., (1985). Fire and its roles in early hominid lifeways. *African Archaeological Review*, vol. 3 (1), p. 3-27.
- CLAUD, E., BERTRAN, P., (2010). Effet de la solifluxion sur les traces d'utilisation des outils lithiques : mise en place d'une expérimentation in vivo à Gavarnie (Hautes-Pyrénées, France). In: C. THIÉBAUT, M.-P. COUMONT, A. AVERBOUGH, (dir.), *Mise en commun des approches en taphonomie : actes du workshop n° 16, XV^e Congrès international de l'UISPP*, Lisbonne, septembre 2006. Paléo supplément, vol. 3, p. 31-42.
- COHEN-OFRI, I., WEINER, L., BOARETTO, E., MINTZ, G., WEINER, S., (2006). Modern and fossil charcoal: aspects of structure and diagenesis. *Journal of Archaeological Science*, vol. 33 (3), p. 428-439.
- COMBOURIEU NEBOUT, N., PEYRON, O., DORMOY, I., DESPRAT, S., BEAUDOUIN, C., KOTTHOFF, U., MARRET, F., (2009). Rapid climatic variability in the west Mediterranean during the last 25 000 years from high resolution pollen data. *Climate of the Past*, vol. 5, p. 503-521.
- COSTAMAGNO, S., THERY-PARISOT, I., BRUGAL, J.-P., GUILBERT, R. (2005). Taphonomic consequences of the use of bones as fuel. Experimental data and archaeological applications. In : T. O'CONNOR (Ed.), *Biosphere to Lithosphere, new studies in vertebrate taphonomy*,

Proceedings of the 9th Conference of the International Council of Archaeozoology, Durham 2002, Oxbow Books, Oxford., p. 51-62.

COSTAMAGNO, S., FOSSE, P., LAUDET, F., (dir.), (2008). Actes de la table ronde "La taphonomie : des référentiels aux ensembles osseux fossiles", 23-25 novembre 2005, Toulouse. *Annales de Paléontologie*, vol. 95 (1), 138 p.

COSTAMAGNO, S., THÉRY-PARISOT, I., (2009). *Programmes expérimentaux en taphonomie*. Les Nouvelles de l'Archéologie, vol. 118, 64p.

COSTAMAGNO, S., THÉRY-PARISOT, I., CASTEL, J.-C., BRUGAL, J.-P., (2009). Combustible ou non ? Analyse multifactorielle et modèles explicatifs sur des ossements brûlés paléolithiques. In : I. THÉRY-PARISOT, S. COSTAMAGNO, A. HENRY (Eds.), *Gestion des combustibles au Paléolithique et au Mésolithique : nouveaux outils, nouvelles interprétations*, Actes du XVème Congrès UISPP, 2-8 septembre 2006, Lisbonne. *Session WS21*. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Reports, International Series 1914, p. 65-84.

COSTAMAGNO, S., THÉRY-PARISOT, I., KUNTZ, D., BON, F., MENSAN, R., (2010). Impact taphonomique d'une combustion prolongée sur des ossements utilisés comme combustible. In: I. THÉRY-PARISOT, L. CHABAL, S. COSTAMAGNO (Eds). *The taphonomy of burned organic residues and combustion features in archaeological contexts*. Proceedings of the round table, Valbonne, May 27-29, 2008. *Palethnologie*, vol. 2, p. 173-187.

COUMONT, M.-P., (2006). *Taphonomie préhistorique : mammifères fossiles en contexte naturel, les avens-pièges. Apport pour l'étude des archéofaunes*. Thèse de doctorat, Université de Provence (Aix-Marseille I), 530 p.

COUMONT, M.-P., (2009). Proposition d'un référentiel fossile à partir des faunes contenues dans les avens-pièges. In : S. COSTAMAGNO, P. FOSSE (orgs.), Actes de la table ronde "La taphonomie : des référentiels aux ensembles osseux fossiles", 23-25 novembre 2005, Toulouse. *Annales de Paléontologie*, vol. 95 (1), p.1-20.

COURTIN, J., VILLA, P., (1982). Une expérience de piétinement. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, vol. 79, p. 117-123.

COURTY, M.-A., GOLDBERG, P., MACPHAIL, R. I., (1989). *Soils and micromorphology in archaeology*. Cambridge manual in archaeology, Cambridge University Press, Cambridge, 344 p.

COUTARD, J.-P., OZOUF, J.-C., GABERT, P., (1996). Modalités de la cryoreptation dans les massifs du Chambeyron et de la Mortice, Haute-Ubaye, Alpes Françaises du sud. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 7 (1), p. 21-51.

COUTARD, J.-P., (2002). Périglaciaire et expérimentation. *Environnements périglaciaires*, vol. 27 (9), p. 3-11.

DAÏAN, J.-F., (2010). *Équilibre et transferts en milieux poreux. Première partie*. Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, 469 p. Édition numérique : <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00452876>

DARWIN, C., (1881). *The Formation of Vegetable Mould, through the Action of Worms with Observations on Their Habits*. Chicago, Chicago University Press, 326 p.

- DAUPHIN, Y., WILLIAMS, C. T., (2004). Diagenetic trends of dental tissues. *Comptes rendus Palevol*, vol. 3, p. 583-590.
- DEBÉNATH, A., JELINEK, A. J., (1998). Nouvelles fouilles à La Quina. *Gallia Préhistoire*, vol. 40. p. 29-74.
- DIBBLE, H. L., BERNA, F., GOLDBERG, P., MCPHERRON, S. P., MENTZER, S., NIVEN, L., RICHTER, D., SANDGATHE, D., THÉRY-PARISOT, I., TURQ, A., (2009). A Preliminary Report on Pech de l'Azé IV, Layer 8 (Middle Paleolithic, France). *PaleoAnthropology*, 2009, p. 182-219.
- DOTTE, E., (2010). Modes d'exploitation et d'intégration au sein des territoires kanak pré-coloniaux des ressources végétales forestières (II^e millénaire apr. J.-C.). Approche ethno-archéo-anthracologique en Nouvelle-Calédonie. In : T. NICOLAS, A. SALAVERT (Eds), *Territoire : Économie de subsistance, économie de croissance*, Travaux de l'École Doctorale Archéologie de l'Université Paris I, Paris : Presse Universitaire de la Sorbonne, p. 155-190.
- DUCOM, A., (2010). *Comportement de charbons de bois face à la compression et applications en archéologie*. Rapport de Stage. École Polytechnique. 23 p.
- DUFRAISSE, A., (2002). *Les habitats littoraux néolithiques des lacs de Chalain et Clairvaux (Jura, France) : collecte du bois de feu, gestion de l'espace forestier et impact sur le couvert arboréen entre 3700 et 2500 av. J.-C. Analyses anthracologiques*. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Besançon, 345 p.
- DUFRAISSE, A., (2005). Économie du bois de feu et sociétés néolithiques. Analyses anthracologiques appliquées aux sites d'ambiance humide des lacs de Chalain et de Clairvaux (Jura, France). *Gallia Préhistoire*, vol. 47, p. 187-233.
- DUFRAISSE, A., (2006). Charcoal anatomy potential, wood diameter and radial growth. In: A. DUFRAISSE (Ed.), *Charcoal analysis: new analytical tools and methods for archaeology*. Papers from the Table-Ronde held in Basel 2004. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Reports, International Series 1483, p. 47-59.
- DUFRAISSE, A., GARCIA-MARTINEZ, M. S., (2011). Mesurer les diamètres du bois de feu en anthracologie. Outils dendrométriques et interprétation des données. *Anthropobotanica*, vol. 2, p. 1-18.
- EFREMOV, I. A., (1940). Taphonomy: a new branch of paleontology. *Pan American Geology*, vol. 74, p. 81-93.
- EPSTEIN, B., (1948). Logarithmico-Normal distribution in Breakage of Solids. *Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 40, p. 2289-2291.
- F.A.O., (1983). *Techniques simples de carbonisation*. Étude FAO : Forêts 41, Rome. Version numérique [<http://www.fao.org/docrep/X5328F/X5328F00.htm>]
- FARRAND, W. R., (1975). Analysis of the Abri Pataud Sediments. In: H. L. MOVIUS (dir.), *Excavation of the Abri Pataud, Les Eyzies (Dordogne)*. Peabody Museum, Harvard University, Cambridge, American School of Prehistoric Research, vol. 30, p. 27-68.
- FARRAND, W. R., (1995). Étude sédimentologique du remplissage de l'abri Pataud. In : H.M. BRICKER (dir.), *Le Paléolithique supérieur de l'abri Pataud (Dordogne) : les fouilles de H. L. Movius Jr.*,

Éditions de la Maison des sciences de l'homme, Paris, Documents d'archéologie française, n° 50, p. 31-65.

FENGEL, D., WEGENER, G., (1989). Wood Chemistry, ultrastructure, reactions. *Walter de Gruyter*, vol. 33, p. 333-335.

FERNANDEZ IBAÑEZ, E., (2002). *Étude de la carbonisation et l'activation de précurseurs végétaux durs et mous*. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, 147 p.

FERNÁNDEZ-JALVO, Y., SCOTT, L., ANDREWS, P., (2010). Taphonomy in palaeoecological interpretations. *Quaternary Science Reviews*, vol. 30 (11-12), p. 1296-1302.

FERNÁNDEZ PERIS, J., GONZÁLEZ, V. B., BLASCO, R., CUARTERO, F., FLUCK, H., SAÑUDO, P., VERDASCO, C., (2012). The earliest evidence of hearths in Southern Europe: The case of Bolomor Cave (Valencia, Spain). *Quaternary International*, vol. 247, p. 267-277.

FEUILLET, T., (2010). *Les formes périglaciaires dans les Pyrénées centrales françaises : analyse spatiale, chronologique et valorisation*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Institut de Géographie et d'Aménagement Régional, 404 p.

FEUILLET, T., SELIER, D., (2008). Observations sur la limite inférieure de l'étage périglaciaire dans les Pyrénées centrales françaises (Bigorre). *Environnements périglaciaires*, vol. 15, p. 59-68.

FEUILLET, T., BERTRAN, P., BALAY, J.-M., (2010). *Régime thermique du sol et des parois dans un domaine périglaciaire de moyennes latitudes (Pyrénées centrales espagnoles)*. Rapport non publié, 23 p.

FIGUEIRAL, I., (1992). Méthode en anthracologie : Étude de sites du Bronze final et de l'âge du Fer du nord-ouest du Portugal. In: J.L. VERNET (Ed.), Actes du colloque : *Les charbons de bois les anciens écosystèmes et le rôle de l'Homme*, Montpellier, 10-13 septembre 1991, Bulletin de la Société Botanique de France, vol. 139 (2-3-4), p. 167-189.

FLETCHER, W. J., SÁNCHEZ GOÑI, M. F., (2008). Orbital- and sub-orbital-scale climate impacts on vegetation of the western Mediterranean basin over the last 48,000 yr. *Quaternary Research*, vol. 70 (3), p. 451-464.

FORD, R. I., (1979). Paleoethnobotany in American Archaeology. *Advances in archaeological method and theory*, vol. 2, p. 285-336.

FOSSE, P., (1994). *Taphonomie paléolithique : les grands mammifères de Soleilhac (Haute-Loire) et de Lunel-Viel 1 (Hérault)*. Thèse de doctorat, Aix-en-Provence - Marseille I, Université de Provence. 205 p.

FRANCOU, B., (1983). Régimes thermiques de sols de l'étage périglaciaire et leurs conséquences géomorphologiques. Exemple de la combe de Laurichard, Alpes du Briançonnais, France. *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 37 (1), p. 27-38.

FRANKLIN, R. E., (1951). Crystallite growth in graphitizing and non-graphitizing carbons. *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 209, p. 196-218.

FRAZER, G. J., (1930). *Mythes sur l'origine du feu*, Paris, Payot, « Petite Bibliothèque Payot », 182 p.

- FRENCH, H. M., (2007). *The Periglacial Environment*. John Wiley V. C. H., Chichester, 478 p.
- GANGLOFF, P., HÉTU, B., COURCHESNE, F., RICHARD, P. J. H., (1994). Présence d'un pergélisol würmien sur le piémont des Pyrénées Atlantiques. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 48 (2), p. 169-178.
- GARCIN, M., BAJOS, C., DEL OLMO, C., GODEFROY, P., (1994). L'Europe de l'Ouest et la péninsule Ibérique de -120 000 ans à l'actuel (reconstitutions cartographiques automatisées). In : B. BEAUDOIN, P. GODEFROY, B. MOUROUX (Eds.). *Le temps en géologie, du passé au futur*, Actes du Colloque Géoprospective, Paris, 10-18 avril 1994. Publication numérique [<http://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00562557>]
- GODRON, M., (1984). *Écologie de la végétation terrestre*. Coll. Abrégés, Masson, Paris, 196 p.
- GOLDBERG, P., (1980). Micromorphology in Archaeology and Prehistory. *Paléorient*, vol. 6, p. 159-164.
- GOLDBERG, P., WEINER, S., BAR-YOSEF, O., XU, Q., LIU, J., (2001). Site formation processes at Zhoukoudian, China. *Journal of Human Evolution*, vol. 41 (5), p. 483-530.
- GOLDBERG, P., MACPHAIL, R., (2006). *Practical and Theoretical Geoarchaeology*. Blackwell Publishing, Malden, MA, Oxford, 479 p.
- GOLDBERG, P., LAVILLE, H., MEIGNEN, L., BAR-YOSEF, O., (2007). Stratigraphy and Geoarchaeological History of Kebara Cave. In: O. BAR-YOSEF, L. MEIGNEN (Eds.), *Kebara Cave Mt Carmel, Israel. The Middle and Upper Paleolithic Archaeology*. Part I. American School of Prehistoric Research Bulletin 49, Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University, 288 p.
- GOLDBERG, P., BERNA, F., (2010). Micromorphology and context. *Quaternary International*, vol. 214 (1-2), p. 56-62.
- GOODRICH, L. E., (1982). The influence of snow cover on the ground thermal regime. *Canadian geotechnical journal*, vol. 19, p. 421-432.
- GOWLETT, J. A. J., HARRIS, J. W. K., WALTON, D., WOOD, B. A., (1981). Early archaeological sites, hominid remains and traces of fire from Chesowanja, Kenya. *Nature*, vol. 294, p. 125-129.
- GRØNLI, M.-G., (1996). *A theoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass*. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 342 p.
- GUADELLI J.-L., (1989). Étude taphonomique du repaire d'hyènes de Camiac (Gironde, France). Éléments de comparaison entre un site naturel et un gisement préhistorique. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, vol. 26 (2), p. 91-100.
- GUITARD, D., (1987). *Mécanique du matériau bois et composites*. Cepadues, Collection Nabla, Toulouse, 338 p.
- GUITER, F., ANDRIEU-PONEL, V., DE BEAULIEU, J.-L., CHEDDADI, R., CALVEZ, M., PONEL, P., REILLE, M., KELLER, T., AND GOEURY, C., (2003). The last climatic cycles in Western Europe: a comparison between long continuous lacustrine sequences from France and other terrestrial records. *Quaternary International*, vol. 111, p. 59-74.

- GÜNDÜZ, G., KORKUT, S., KORKUT, D. S., (2008). The effects of heat treatment on physical and technological properties and surface roughness of Camiyanı Black Pine (*Pinus nigra* Arn. subsp. *pallasiana* var. *pallasiana*) wood. *Bioresource Technology*, vol. 99, p. 2275-2280.
- HAVINGA A. J., (1984). A 20-year experimental investigation into the differential corrosion susceptibility of pollen and spores in various soil types. *Pollen et Spores*, vol. 26 (3-4), p. 541-558.
- HAYNES, G., (1991). *Mammoths, Mastodons and Elephants: Biology, Behavior and the Fossil Record*. Cambridge, Cambridge University Press, 413 p.
- HEINZ, C., (1990). *Dynamique des végétations holocènes en méditerranée Nord-occidentale d'après l'antracoanalyse de sites préhistoriques : méthodologie et paléoécologie*. Paléobiologie continentale, vol. 16 (2), Montpellier, 212 p.
- HENRY, A., (2011). *Paléoenvironnements et gestion des combustibles au Mésolithique dans le sud de la France : anthracologie, ethnoarchéologie et expérimentation*. Thèse de doctorat, Université de Nice Sophia Antipolis, 444 p.
- HENRY, A., THÉRY-PARISOT, I., VORONKOVA, E., (2009). La gestion du bois de feu en forêt boréale : problématique archéo-anthracologique et étude d'un cas ethnographique (Région de l'Amour, Sibérie). In : I. THÉRY-PARISOT, S. COSTAMAGNO, A. HENRY (Eds.), *Gestion des combustibles au Paléolithique et au Mésolithique : nouveaux outils, nouvelles interprétations*, Actes du XVème Congrès UISPP, 2-8 septembre 2006, Lisbonne. *Session WS21*. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Reports, International Series 1914, p. 17-37.
- HILLIS, W. E., (1984). High temperature and chemical effects on wood stability. *Wood Science Technology*, vol. 18, p. 281-293.
- HILTON, M. R., (2003). Quantifying Postdepositional Redistribution of the Archaeological Record Produced by Freeze–Thaw and Other Mechanisms: An Experimental Approach. *Journal of Archaeological Method and Theory*, vol. 10 (3), p. 165-202.
- HOFRICHTER, M., FRITSCH, W., (1997). Depolymerization of low-rank coal by extracellular fungal enzyme systems. II. In vitro depolymerization of coal humic acids by a crude preparation of manganese peroxidase of the white-rot fungus *Nematoloma frowardii* b19. *Applied Microbiology Biotechnology*, vol. 47, p. 566-571.
- JAMES, S. R., (1989). Hominid Use of Fire in the Lower and Middle Pleistocene: A Review of the Evidence. *Current Anthropology*, vol. 30 (1), p. 1-26.
- JOHNSON, D. L., (2002). Darwin would be proud: bioturbation, dynamic denudation, and the power of theory in science. *Geoarchaeology*, vol. 17, p. 7-40.
- JOLY, D., MARCH, R., MARGUERIE, D., YACOBACCIO, H., (2009). Gestion des combustibles actuels et passés dans la province de Jujuy (Puna, Argentine). In : I. THÉRY-PARISOT, S. COSTAMAGNO, A. HENRY (Eds.), *Gestion des combustibles au Paléolithique et au Mésolithique : nouveaux outils, nouvelles interprétations*, Actes du XVème Congrès UISPP, 2-8 septembre 2006, Lisbonne. *Session WS21*. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Reports, International Series 1914, p. 39-56.

- JOUZEL, J., (1999). Calibrating the isotopic paleothermometer. *Science*, vol. 286, p. 910-912.
- JULIEN, M., (1984). L'usage du feu à Pincevent (Seine et Marne). In : H. BERKE, J. HAHN, C.J. KIND (Eds.), *Les Structures d'habitat au Paléolithique supérieur en Europe*, Urgeschichtliche Materialhefte, vol. 6, p. 161-168.
- KARKANAS, P., BAR-YOSEF, O., GOLDBERG, P. AND WEINER, S., (2000). Diagenesis in prehistoric caves: the use of minerals that form in situ to assess the completeness of the archaeological record. *Journal of Archaeological Science*, vol. 27, p. 915-929.
- KARKANAS, P., RIGAUD, J.-PH., SIMEK, J. F., ALBERT, R.-M., WEINER, S., (2002). Ash Bones and Guano: a Study of the Minerals and Phytoliths in the Sediments of Grotte XVI, Dordogne, France. *Journal of Archaeological Science*, vol. 29 (7), p. 721-732.
- KARKANAS, P., SHAHACK-GROSS, R., AYALON, A., BAR-MATTHEWS, M., BARKAI, R., FRUMKIN, A., GOPHER, A., STINER, M. C., (2007). Evidence for habitual use of fire at the end of the Lower Paleolithic: Site-formation processes at Qesem Cave, Israel. *Journal of Human Evolution*, vol. 53, p. 197-212.
- KARKANAS, P., GOLDBERG, P., (2010). Site formation processes at Pinnacle Point Cave 13B (Mossel Bay, Western Cape Province, South Africa): resolving stratigraphic and depositional complexities with micromorphology. *Journal of Human Evolution*, vol. 59 (3-4), p. 256-273.
- KERVAZO, B., TEXIER, J.-P., (2009-2010). Le site paléolithique de la grotte XVI (Dordogne, France) : lithostratigraphie, processus de formation et essai de chronologie. *Paleo*, vol. 21, p. 163-188.
- KOCAEFE, D., PONCSAK, S., TANG, J., BOUZARA, M., (2010). Effect of heat treatment on the mechanical properties of North American jack pine: thermogravimetric study, *Journal of Mater Sciences*, vol. 45, p. 681-687.
- KORKUT, S., AKGÜL, M., DÜNDAR, T., (2008). The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Bioresource Technology*, vol. 99, p. 1861-1868.
- KORKUT, S., HIZIROGLU, S., (2009). Effect of heat treatment on mechanical properties of hazelnut wood (*Corylus colurna* L.). *Materials and Design*, vol. 30, p. 1853-1858.
- LANCELOTTI, C., MADELLA, M., AJITHPRASAD, P., PETRIE, C., (2010). Temperature, compression and fragmentation: an experimental analysis to assess the impact of taphonomic processes on charcoal preservation. *Archaeological and Anthropologica Sciences*, vol. 2, p. 307-320.
- LANCELOTTI, C., MADELLA, M., (2012). The 'invisible' product: Developing markers for identifying dung in archaeological contexts. *Journal of Archaeological Science*, vol. 39 (4), p. 953-963.
- LAROULANDIE, V., (2000). *Taphonomie et archéozoologie des Oiseaux en grotte : applications aux sites paléolithiques du Bois-Ragot (Vienne), de Combe Saunière (Dordogne) et de La Vache (Ariège)*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I, 396 p.
- LAROULANDIE, V., MALLYE, J., DENYS, C., (2011). *Taphonomie des petits vertébrés: Référentiels et transferts aux fossiles*, Actes de la Table Ronde du RTP Taphonomie, Talence 20-21 octobre

2009. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Reports, International Series 2269, 194 p.
- LEBRETON, V., MESSEGER, E., MARQUER, L., RENAULT-MISKOVSKY, J., (2010). A neotaphonomic experiment in pollen oxidation and its implications for archaeopalynology. *Review of Palaeobotany and Palynology*, vol. 162, p. 29-38.
- LENOBLE, A., ORTEGA, I., BOURGUIGNON, L., (2000). Processus de formation du site moustérien de Champs-de-Bossuet (Gironde) / Formation processes of the mousterian site of Champs-de-Bossuet (Gironde, France). *Paléo*, vol. 12, p. 413-425.
- LENOBLE, A., BORDES, J.-G., (2001). Une expérience de piétinement et de résidualisation par ruissellement. In : L. BOURGUIGNON , I. ORTEGA, M.-CH. FRERE-SAUTOT (dir.), *Préhistoire et approche expérimentale*, Montagnac, Ed. Monique Mergoïl, p. 295-311.
- LENOBLE, A., BERTRAN, P., LACRAMPE, F., BOURGUIGNON, L., DETRAIN, L., (2003). Impact de la solifluxion sur les niveaux archéologiques : simulation à partir d'une expérience en milieu actif et application à des sites paléolithiques aquitains. *Paleo*, vol. 15, p. 105-122.
- LENOBLE, A., BERTRAN, P., (2004). Fabric of Palaeolithic levels: methods and implications for site formation processes. *Journal of Archaeological Science*, vol. 31 (4), p. 457-469.
- LENOBLE, A., (2005). *Ruissellement et formation des sites préhistoriques : référentiel actualiste et exemples d'application au fossile*. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Report, International Series 1363, 212 p.
- LENOBLE, A., BERTRAN, P., LACRAMPE, F., (2008a). Solifluxion-induced modifications of archaeological levels : simulation based on experimental data from a modern periglacial slope and application to French Palaeolithic sites. *Journal of Archaeological Science*, vol. 35 (1), p. 99-110.
- LENOBLE, A., BERTRAN, P., BEAUVAL, C., LAROU LANDIE, V., BOULOGNE, S., COSTAMAGNO, S., LACRAMPE-CUYAUBÈRE, F., MOURRE, V., ONÉZIME, O., THIEBAUT, C., TEXIER, J.-P., (2008b). Études de taphonomie archéologique en milieu périglaciaire actuel : le projet Gavarnie. *Archéosciences, revue d'Archéométrie*, vol. 32, p. 7-13.
- LENOBLE, A., BERTRAN, P., BOULOGNE, S., MASSON, B., VALLIN, L., (2009). Évolutions des niveaux archéologiques en contexte périglaciaire : apport de l'expérience Gavarnie. *Les Nouvelles de l'Archéologie*, vol. 118, p. 16-20.
- LENOBLE, A., BERTRAN, P., MERCIER, N., SITZIA, L., (2012). Le site du Lac Bleu et la question de l'extension du pergélisol en France au Pléistocène supérieur. In : P. BERTRAN, A. LENOBLE (dir.), *Quaternaire continental d'Aquitaine : un point sur les travaux récents*, Livret-guide de l'excursion AFEQ-ASF 2012, Université de Bordeaux, AFEQ, p. 107-121.
- LEROI-GOURHAN, A., BRÉZILLON, M., (1972). *Fouille de Pincevent ; essai d'analyse ethnographique d'un habitat magdalénien*. Paris, Supplément à Gallia Préhistoire, Éditions du CNRS, 2 vol., 331 p.
- LEVAVASSEUR, G., VRAC, M., ROCHE, D. M., PAILLARD, D., MARTIN, A., VANDENBERGHE, J., (2011). Present and LGM permafrost from climate simulations: contribution of statistical downscaling. *Climate of the Past*, vol. 7, p. 1647–1692.

- LINGENS, A., WINDEISEN, E., WEGENER, G., (2005). Investigating the combustion behavior of various wood species via their fire gases. *Wood Science and Technology*, vol. 39 (1), p. 49–60.
- LLIBOUTRY, L., (1965). *Traité de glaciologie*. Paris, Masson, 2 t., 1040 p.
- LOREAU, P., (1994). *Du bois au charbon de bois: approche expérimentale de la combustion*. Mémoire de D.E.A., Université de Montpellier II, 64p.
- LUDEMANN, T., AND NELLE, O., (2002). *Die Wälder am Schauinsland und ihre Nutzung durch Bergbau und Köhlerei*. Freiburger und Forstliche Versuchs und Forschungsanstalt, vol. 15, p. 1-139.
- MACPHAIL, R. I., (1999). Sediment micromorphology. In: M.B. Roberts and S.A. Parfitt (Eds), *Boxgrove. A Middle Pleistocene hominid site at Eartham Quarry. Boxgrove, West Sussex*. English Heritage Monograph, London, vol. 17, p. 118-148.
- MAJANO-MAJANO, A., HUGHES, M., FERNANDEZ-CABO, J. L., (2012). The fracture toughness and properties of thermally modified beech and ash at different moisture contents. *Wood Science Technology*, vol. 46, p. 5-21.
- MALLOL, C., MARLOWE, F. W., WOOD, B. M., PORTER, C. C., (2007). Wind, and fire: ethnoarchaeological signals of Hadza fires. *Journal of Archaeological Science*, vol. 34 (12), p. 2035-2052.
- MALLOL, C., CABANES, D., BAENA, J., (2010). Microstratigraphy and diagenesis at the upper Pleistocene site of Esquilleu Cave (Cantabria, Spain). *Quaternary International*, vol. 214 (1-2), p. 70-81.
- MALLOL, C., BERTRAN, P., (Eds.), (2010). *Geoarchaeology and taphonomy*. Actes de la rencontre "Geoarchaeology and Taphonomy", Aix-en-Provence, France, 24-26 September 2008. *Quaternary International*, vol. 214, 118 p.
- MALLYE, J.-B., (2007). *Les restes de Blaireau en contexte archéologique : taphonomie, archéozoologie et éléments de discussion des séquences préhistoriques*. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 548 p.
- MALLYE, J.-B., COSTAMAGNO, S., LAROULANDIE, V., BEAUVAL, C., (2009). Impacts des processus périglaciaires sur la préservation des ossements. *Les Nouvelles de l'Archéologie*, vol. 118, p. 26-31.
- MARCH, R. J., (1996). L'étude des structures de combustion préhistoriques : une approche interdisciplinaire. In: O. BAR-YOSEF, I. CAVALLI-SFORZA, R.J. MARCH, M. PIPERNO (Eds), *The Lower and Middle Paleolithic*, XIII International Congress of prehistoric and protohistoric sciences, Forli, Italia, 8-14 September 1996, p. 251-75.
- MARGUERIE, D., (1992). *Évolution de la végétation sous l'impact anthropique en Armorique du Mésolithique au Moyen Age : études palynologiques et anthracologiques des sites archéologiques et des tourbières associées*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 412 p.
- MARGUERIE, D., HUNOT J.-Y., (2007) Charcoal analysis and dendrology : data from archaeological sites in western France. *Journal of Archaeological Sciences*, vol. 34, p. 1417-1433.

- MARQUER, L., OTTO, T., NESPOULET, R., CHIOTTI, L., (2010). A new approach to study the fuel used in hearths by hunter-gatherers at the Upper Palaeolithic site of Abri Pataud (Dordogne, France). *Journal of Archaeological Science*, vol. 37, p. 2735-2746.
- MBURU, F., DUMARÇAY, S., BOCQUET, J.-F., PÉTRISSANS, M., GÉRARDIN, P., (2008). Effect of chemical modifications caused by heat treatment on mechanical properties of *Grevillea robusta* wood. *Polymer Degradation and Stability*, vol. 93, p. 401-405.
- McBREARTY, S., (1990). Consider the humble termite: Termites as agents of post-depositional disturbance at African archaeological sites. *Journal of Archaeological Science*, vol. 17 (2), p. 111-143.
- McPARLAND, L. C., COLLINSON, M. E., SCOTT, A. C., STEART, D. C., GRASSINEAU, N. V., GIBBONS, S. J., (2007). Ferns and fires: experimental charring of ferns compared to wood and implications for palaeobiology, palaeoecology, coal petrology, and isotope geochemistry. *Palaios*, vol. 22 (5), 528-538.
- McPARLAND, L. C., COLLINSON, M. E., SCOTT, A. C., CAMPBELL, G., (2009). The use of reflectance values for the interpretation of natural and anthropogenic charcoal assemblages. *Archaeological and Anthropological Science*, vol. 1, p. 249-261.
- McPARLAND, L. C., COLLINSON, M. E., SCOTT, A. C., CAMPBELL, G., VEAL, R., (2010). Is vitrification in charcoal a result of high temperature burning of wood? *Journal of Archaeological Science*, vol. 37 (10), p. 2679-2687.
- MEIGNEN, L., BEYRIES, S., SPETH, J., BAR-YOSEF, O., (1998). Acquisition, traitement des matières animales et fonction du site au Paléolithique moyen dans la grotte de Kebara (Israël) approche interdisciplinaire. In : L. MEIGNEN, J.-P. BRUGAL, M. PATOU-MATHIS (Eds.), *Économie préhistorique : les comportements de subsistance au Paléolithique*, Actes des XVIII^e Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, Sophia Antipolis : Éditions APDCA, p. 227-242.
- MEIGNEN, L., BAR-YOSEF, O., GOLDBERG, P., WEINER, S., (2001). Le feu au Paléolithique moyen : recherches sur les structures de combustion et le statut des foyers. L'exemple du Proche-Orient. *Paléorient*, vol. 26 (2), p. 9-22.
- MEIGNEN, L., GOLDBERG, P., ALBERT, R.-M., BAR-YOSEF, O. (2009). Structures de combustion, choix des combustibles et degré de mobilité des groupes dans le Paléolithique moyen du Proche-Orient (grottes de Kebara et d'Hayonim, Israël). In : I. THÉRY-PARISOT, S. COSTAMAGNO, A. HENRY (Eds.), *Gestion des combustibles au Paléolithique et au Mésolithique : nouveaux outils, nouvelles interprétations*, Actes du XV^e Congrès UISPP, 2-8 septembre 2006, Lisbonne. *Session WS21*. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Reports, International Series 1914, p. 101-118.
- MEYSMAN, F. J. R., MIDDELBURG, J. J., HEIP, C. H. R., (2006). Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea. *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 21 (12), p. 688-695.
- MOUTARDE, F., (2006). *L'évolution du couvert ligneux et de son exploitation par l'homme dans la vallée du Lurin (côte centrale du Pérou), de l'Horizon Ancien (900-100 av. J.-C.) à l'Horizon Tardif (1460-1532 ap. J.-C.)*. Approche anthracologique. Thèse de doctorat, Université de Paris I-Panthéon-Sorbonne, 2 vol., 505 p.

- MOSKAL-DEL HOYO, M., WACHOWIAK, M., BLANCHETTE, R. A., (2010). Preservation of fungi in archaeological charcoal. *Journal of Archaeological Science*, vol. 37 (9), p. 2106-2116.
- MUKASA-MUGERWA, T. T., DAMES, J. F., ROSE, P. D., (2011). The role of a plant/fungal consortium in the degradation of bituminous hard coal. *Biodegradation*, vol. 22 (1), p. 129-141.
- NAVI, P., HEGER, F., (2005). *Comportement thermo-hydrromécanique du bois. Applications technologiques et dans les structures*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne, 298 p.
- NICHOLS, G., CRIPPS, J. A., COLLINSON, M. E., SCOTT, A. C., (2000). Experiments in waterlogging and sedimentology of charcoal: results and implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 164 (1-4), p. 43-56.
- NISHIMIYA, K., HATA, T., IMAMURA, Y., ISHIHARA, S., (1998). Analysis of chemical structure of wood charcoal by X-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Wood Science*, vol. 44, p. 56-61.
- NOWELL, A., D'ERRICO, F., (2007). The Art of Taphonomy and the Taphonomy of Art: Layer IV, Molodova I, Ukraine. *Journal of Archaeological Method and Theory*, vol. 14 (1), p. 1-26.
- NTINOU, M., (2002). *La Paleovegetación en el Norte de Grecia del Tardiglaciario hasta el Atlántico : formaciones vegetales, recursos y usos*. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Reports, International Series 1038, 268 p.
- NURY, D., (1969). Présence de figures de cryoturbation et de cailloutis quaternaires à l'Ouest de Martigues (Bouches-du-Rhône). *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, vol. 6 (2), p. 139-143.
- OLIVE, M., TABORIN, Y., (dir), (1989). *Nature et fonction des foyers préhistoriques*, Actes du Colloque International de Nemours, 12-14 mai 1987. Nemours, APRAIF Ed., Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile de France, vol. 2, 334p.
- OLIVE, M., KETTERER, I., WATTEZ, J., (2004). Les foyers et les activités liées au feu, in N. Pigeot dir., *Les derniers Magdaléniens d'Étiolles. Perspectives culturelles et paléohistoriques (l'unité d'habitation Q31)*, XXXVII^e supplément à Gallia Préhistoire, Ed. du CNRS, Paris, p. 221-233.
- PARADIS, S., (2007). *Étude dendro-anthracologique : une approche méthodologique pour l'étude des calibres de bois. Application sur des charbonnières médiévales du Mont-Lozère (France, 48)*. Mémoire de Master II, Université de Dijon, 76 p.
- PARADIS, S., (2012). *Étudier les « forêts métallurgiques » : analyses dendro-anthracologiques et approches géohistoriques. Exemples des forêts du mont Lozère et du Périgord-Limousin*. Thèse de doctorat, Géographie, Université de Limoges, 452 p.
- PATOU-MATHIS, M., (1995). Zones d'activités, zones de déchets dans les gisements en abri au Paléolithique. Informations fournies par les ossements de grands mammifères, *Anthropozoologica*, vol. 21, p. 115-122.
- PERLÈS, C., (1977). *Préhistoire du feu*. Ed. Masson, 180p.

- PERNAUD, J.-M., (1997). *Paléoenvironnements végétaux et sociétés à l'Holocène dans le nord du Bassin Parisien. Anthraco-analyses des sites archéologiques d'Île-de-France et de Picardie : Méthodologie et Paléoécologie*. Thèse de doctorat, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, 178 p.
- PIGEOT, N., (dir.), (2004). *Les derniers Magdaléniens d'Étiolles. Perspectives culturelles et paléohistoriques (l'unité d'habitation Q31)*, XXXVII^e supplément à Gallia Préhistoire, Ed. du CNRS, Paris, 351 p.
- PIQUÉ, R., (1999). Quantification in Archaeobotany : Charcoal Analysis and Fire-Wood Management. In: J.A. BARCELÓ, I. BRIZ AND A. VILA (Eds.), *New Techniques for Old Times. CAA98. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. Proceedings of the 26th Conference, Barcelona, March 1998. Archaeopress, Oxford, British Archaeological Reports, International Series 757, p. 188-200.
- PLISSON, H., MAUGER, M., (1988). Chemical and mechanical alteration of microwear polishes: an experimental approach. *Helinium*, vol. 28 (1), p.3-16.
- POLETO, M., ZATTERA, A. J., FORTE, M. M.C., SANTANA, R. M.C., (2012). Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. *Bioresource Technology*, vol. 109, p. 148-153.
- PRIOR, J., PRICE-WILLIAMS, D., (1985). An investigation of climate change in the Holocene epoch using archaeological wood charcoal from Swaziland, Southern Africa. *Journal of Archaeological Science*, vol. 12, p. 457-475.
- PRIOR, J., GASSON, P., (1993). Anatomical changes on charring six African hardwoods. *IAWA Journal*, vol. 14, p. 77-86.
- REBOLLO, N.-R., COHEN-OFRI, I., POPOVITZ-BIRO, R., BAR-YOSEF, O., MEIGNEN, L., GOLDBERG, P., WEINER, S., BOARETTO, E., (2008). Structural characterization of charcoal exposed to high and low pH: implications for 14c sample preparation and charcoal preservation. *Radiocarbon*, vol. 50 (2), p 289-307.
- REICHE, I., (1997). *Processus physicochimiques d'altération des ossements et ivoires anciens*. Thèse de doctorat, Paris, Université Paris VI. 278 p.
- RIGAUD, J.-P., SIMEK, J. F., GE, T., (1995). Mousterian fire of Grotte XVI (Dordogne, France). *Antiquity*, vol. 69, p. 902-912.
- ROBERTS, M. B., PARFITT, S. A., (dir.), (1999). *Boxgrove : a Middle Pleistocene hominid site at Earthen Quarry, Boxgrove, West Sussex*. English Heritage, Archaeological report, vol. 17, 456 p.
- ROEBROEKS, W., VILLA, P., (2011a). On the earliest evidence for habitual use of fire in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108 (13), p. 5209-5214.
- ROEBROEKS, W., VILLA, P., (2011b). Reply to Sandgathe et al.: Neandertal use of fire. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108 (29), p. E299-E299.
- ROSSEN, J., OLSON, J., (1985). The controlled carbonisation and archaeological analysis of SE U.S. wood charcoals. *Journal of Field Archaeology*, vol. 12, p. 445-456.

- ROUSSET, P., (2004). *Choix et validation expérimentale d'un modèle de Pyrolyse pour le bois traité par haute température : De la micro-particule au bois massif*. Thèse de doctorat de L'ENGREF, 1 vol., 185 p.
- ROUSSET, P., TURNER, I., DONNOT, A., PERRÉ, P., (2006). Choix d'un modèle de pyrolyse ménagée du bois à l'échelle de la microparticule en vue de la modélisation macroscopique. *Annals of Forest Science*, vol. 63, p. 213-229.
- ROWLETT, R. M., (2000). Fire control by Homo erectus in East Africa and Asia. *Acta Anthropologica Sinica*, vol. 19, p. 198-208.
- SALISBURY, K. J., JANE, F. W., (1940). Charcoals from Maiden Castle and their significance in relation to the vegetation and climatic conditions in prehistoric times. *Journal of Ecology*, vol. 28, p. 310-325.
- SANDGATHE, D. M., (2011). On the role of fire in Neandertal adaptations in Western Europe: Evidence from Pech de l'Aze IV and Roc de Marsal, France. *PaleoAnthropology*, 2011, p. 216-242.
- SANDGATHE, D. M., DIBBLE, H. L., GOLDBERG, P., MCPHERRON, S. P., TURQ, A., NIVEN, L., HODGKINS, J., (2011). Timing of the appearance of habitual fire use. *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 108, p. E298.
- SANTA, S., (1961). Essai de reconstitution de paysages végétaux quaternaires d'Afrique de Nord. *Libyca*, vol. 6-7, p. 37-77.
- SASIAS, M., (2006). *Dégradation d'un site archéologique expérimental en milieu périglaciaire à Gavarnie (Hautes Pyrénées), Premiers travaux*. Mémoire de Master 2, Université de Bordeaux I, 74 p.
- SAUER, C. O., (1962). Fire and Early Man. *Paideuma*, vol. 7, p. 399-407.
- SCHIEGL, S., LEV-YADUM, S., BAR-YOSEF, O., EL GOSERY, A., WEINER, S., (1994). Siliceous aggregates from prehistoric wood-ash: a major component of sediments in Kebara and Hayonim caves (Israel). *Israel Journal of Earth Sciences*, vol. 43, p. 267-278.
- SCHIEGL, S., GOLDBERG, P., BAR-YOSEF, O., WEINER, S., (1996). Ash deposits in Hayonim and Kebara caves, Israel: macroscopic, microscopic and mineralogical observations, and their archaeological implications. *Journal of Archaeological Science*, vol. 23 (5), p. 763-781.
- SCHIEGL, S., GOLDBERG, P., PFRETZSCHNER, H.-U., CONARD, N. J., (2003). Paleolithic burnt bone horizons from the Swabian Jura: Distinguishing between *in situ* fireplaces and dumping areas. *Geoarchaeology*, vol. 18, p. 541-565.
- SCOTT, A. C., (2010). Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 291 (1-2), p. 11-39.
- SCOTT, A. C., JONES, T. P., (1991). Microscopical observations of recent and fossil charcoal. *Microscopy and Analysis*, vol. 24, p. 13-15.

- SCOTT, A. C., CRIPPS, J. A., COLLINSON, M. E., NICHOLS, G. J., (2000). The taphonomy of charcoal following a recent heathland fire and some implications for the interpretation of fossil charcoal deposits. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 164 (1-4), p. 1-31.
- SCOTT, A. C., DAMBLON, F., (2010). Charcoal: taphonomy and significance in geology, botany and archaeology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 291 (1-2), p. 1-10.
- SHACKLETON, C. M., PRINS, F., (1992). Charcoal analysis and the "Principle of Least Effort". A conceptual model. *Journal of Archaeological Science*, vol. 19, p. 631-637.
- SMART, T. L., HOFFMAN, E. S., (1988). Environmental interpretation of archaeological charcoal. In: C. A. HASTORF, V. S. POPPER (Eds.), *Current Paleoethnobotany analytical methods and cultural interpretations of archaeological plant remains*. Univ. Chicago Press, Chicago, USA, p. 167-205.
- SOLARI, M.-E., (1992). Anthracologie et ethnoarchéologie dans l'archipel du Cap Horn (Chili). In: J.L. VERNET (Ed.), *Actes du colloque : Les charbons de bois les anciens écosystèmes et le rôle de l'Homme*, Montpellier, 10-13 septembre 1991, Bulletin de la Société Botanique de France, vol. 139 (2-3-4), p. 407-420.
- SPETH, J. D., TCHERNOV, E., (2001). Neandertals Hunting and Meat-Processing in the Near East. In: C.B. STANFORD, H.T. BUNN (Eds.), *Meat-Eating and Human Evolution*. Oxford, Oxford University Press, p. 52-72.
- STEIN, J., (1983). Earthworms activity: a source of potential disturbance of archaeological sediments. *American Anthropology*, vol. 48, p. 277-289.
- STINER, M. C., KUHN, S. L., WEINER, S., BAR-YOSEF, O., (1995). Differential Burning, Recrystallization, and Fragmentation of Archaeological Bones. *Journal of Archaeological Science*, vol. 22, p. 223-237.
- TABORIN, Y., (1989). Le foyer : document et concept. Nature et fonction des foyers préhistoriques. In : M. OLIVE, Y. TABORIN (dir), *Nature et fonction des foyers préhistoriques*, Actes du Colloque International de Nemours, 12-14 mai 1987. Nemours, APRAIF Ed., Mémoires du Musée de Préhistoire d'Ile de France, vol. 2, p. 77-80.
- TENGBERG, M., (1998). *Paléoenvironnements et économie végétale en milieu aride : recherches archéobotaniques dans la région du Golfe arabo-persique et dans le Makran pakistanais (4ème millénaire av. notre ère - 1er millénaire de notre ère)*. Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier II, 276 p.
- TEXIER, J.-P., (1996). Présence d'un réseau de grands polygones au sud de l'estuaire de la Gironde (France) : interprétation et implications paléoclimatiques. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 50 (1), p. 103-108.
- TEXIER, J.-P., (2000). À propos des processus de formation des sites préhistoriques. *Paléo*, vol. 12, p. 379-386.
- TEXIER, J.-P., (2006a). Nouvelle lecture géologique du site paléolithique du Pech-de-l'Azé II (Dordogne, France). *Paléo*, vol. 18, p. 217-236.

- TEXIER, J.-P. (dir.), (2006b). *Sédimentogenèse des sites préhistoriques classiques du Périgord*. Livret-guide de l'excursion de l'Association française de sédimentologie, Édition numérique I, 2006, Pôle International de Préhistoire, 83 p.
[\[http://www.sedimentologie.fr/1/upload/livre_44.pdf\]](http://www.sedimentologie.fr/1/upload/livre_44.pdf)
- TEXIER, J.-P., BERTRAN, P., (1993). Nouvelles données sur l'extension d'un Pergélisol en Aquitaine au cours des dernières glaciations. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 4, p. 183-198.
- TEXIER, J.-P., BERTRAN, P., COUTARD, J.-P., FRANCOU, B., GABERT, P., GUADELLI, J.-L., OZOUF, J.-C., PLISSON, H., RAYNAL, J.-P., VIVENT, D., (1998). TRANSIT, an experimental archaeological program in periglacial environment: problem, methodology and first results. *Geoarchaeology*, vol 13 (5), p.433-473.
- THÉRY-PARISOT, I., (1998). *Économie des combustibles et paléoécologie en contexte glaciaire et périglaciaire, Paléolithique moyen et supérieur du sud de la France*. *Anthracologie, Expérimentation, Taphonomie*. Thèse de doctorat, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, 500 p.
- THÉRY-PARISOT, I., (2001). *Économie des combustibles au Paléolithique, Anthracologie, Expérimentation, Taphonomie*. Dossier de Documentation Archéologique n°20, CNRS Éditions, 195p.
- THÉRY-PARISOT, I., (2002). Fuel management (bone and wood) during the lower Aurignacian in the Pataud rock shelter (Lower Palaeolithic, Les Eyzies de Tayac, Dordogne, France): contribution of experimentation and anthraco-analysis to the study of the socio-economic behaviour. *Journal of Archaeological Science*, vol. 29, p. 1415-1421.
- THÉRY-PARISOT, I., GRIL, J., MEIGNEN, L., VERNET, J.-L., MAURY, J., (1995). First use of coal. *Nature*, vol. 373, p. 480-481.
- THÉRY-PARISOT, I., GRIL, J., MEIGNEN, L., VERNET, J.-L., MAURY, J., (1996). Coal used for fuel at two prehistoric sites in Southern France : Les Canalettes and Les Usclades. *Journal of Archaeological Science*, vol. 23, p. 509-512
- THÉRY-PARISOT, I., MEIGNEN, L., (2000). Économie des combustibles – bois et lignite – dans l'abri moustérien des Canalettes (Nant, Aveyron). De l'expérimentation à la simulation des besoins énergétiques. *Gallia Préhistoire*, vol. 42, p.45-55.
- THÉRY-PARISOT, I., BRUGAL, J.-P., COSTAMAGNO, S., GUILBERT, R., (2004). Conséquences taphonomiques de l'utilisation des ossements comme combustible : approche expérimentale. *Les Nouvelles de l'Archéologie*, vol. 95, p.19-22.
- THÉRY-PARISOT, I., COSTAMAGNO, S., (2005). Propriétés combustibles des ossements. Données expérimentales et réflexions archéologiques sur leur emploi dans les sites paléolithiques. *Gallia Préhistoire*, vol. 47, p. 235-254.
- THÉRY-PARISOT, I., TEXIER, P.-J., (2006). L'utilisation du bois mort dans le site moustérien de la Combette (Vaucluse). Apport d'une approche morphométrique des charbons de bois à la définition des fonctions de site, au Paléolithique. *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, vol. 103 (3), p. 453-463.

- THÉRY-PARISOT, I., CHABAL, L., CHRZAVZEZ, J., (2010a). Anthracology and taphonomy, from wood gathering to charcoal analysis. A review of the taphonomic processes modifying charcoal assemblages. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, vol. 291 (1-2), p. 142-153.
- THÉRY-PARISOT, I., CHABAL, L., NTINOU, M., BOUBY, L., CARRÉ, A., (2010b). Du bois aux charbons de bois, approche expérimentale de la combustion. In : I. THÉRY-PARISOT, L. CHABAL, S. COSTAMAGNO (Eds), *Taphonomie de la combustion, des résidus organiques et des structures de combustion en contexte archéologique*. Actes de la table ronde, 27-29 mai 2008. *Palethnologie*, vol. 2, p. 81-93.
- THÉRY-PARISOT, I., CHABAL, L., COSTAMAGNO, S., (Eds), (2010c). *Taphonomie de la combustion, des résidus organiques et des structures de combustion en contexte archéologique*. Actes de la table ronde, 27-29 mai 2008. *Palethnologie*, vol. 2, 223p.
- THÉRY-PARISOT, I., HENRY, A., CARRÉ, A., (2012). Seasoned or green? A new method to identify the use of green wood for fuel among archaeological charcoal. *Journal of Archaeological Science*, vol. 39 (2), p. 381-388.
- THÉRY-PARISOT, I., (2013). *Gestion des ressources combustibles et environnements des sociétés préhistoriques du sud de la France. Apport de l'expérimentation à la compréhension des pratiques et des dépôts*. Mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches, Université de Nice Sophia Antipolis, 187p.
- THIÉBAULT, S., (1980). *Étude critique des aires de combustion en France*, Mémoire de Maîtrise. Université de Paris I, Paris. 246 p.
- THIÉBAUT, C., COUMONT, M.-P., AVERBOUH, A., (Eds.), (2010a). *Mise en commun des approches en taphonomie*. Actes du Workshop n° 16, XV^{ème} Congrès de l'UISPP, Lisbonne, sept. 2006, Supplément à Paléo, vol. 3, 134 p.
- THIÉBAUT, C., COSTAMAGNO, S., COUMONT, M.-P., MOURRE, V., PROVENZANO, N., THERY-PARISOT, I., (2010b). Approche expérimentale des conséquences du piétinement des grands herbivores sur les vestiges archéologiques. In : M.-P. COUMONT, C. THIÉBAULT, A. AVERBOUH (Eds). *Mise en commun des approches en taphonomie*. Actes du workshop n°16, XV^{ème} Congrès de l'UISPP, Lisbonne, sept. 2006, Supplément à Paléo, vol. 3, p. 109-130.
- THINON, M., (1992). *Analyse pédoanthracologique : aspects méthodologiques et applications*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille III, 317 p.
- TRABAUD, L., (1989). *Les feux de forêts, mécanismes, comportement et environnement*. Aubervilliers, France-sélection Ed., 278 p.
- TRICART, J., (1956). *Carte des phénomènes périglaciaires quaternaires en France*. Mémoire du Service de la Carte Géologique de France, Paris, 40 p.
- UZQUIANO, P., (1997). Antracología y métodos : Implicaciones en la Economía Prehistórica, Etnoarqueología y Paleocología. *Trabajos de Prehistoria*, vol. 54 (1), p. 145-154.

- VAN ANDEL, T. H., (2002). The Climate and Landscape of the Middle Part of the Weichselian Glaciation in Europe: The Stage 3 Project. *Quaternary Research*, vol. 57 (1), p. 2-8.
- VAN VLIET-LANOË, B., (1987). Dynamique périglaciaire actuelle et passée. Apport de l'étude micromorphologique et de l'expérimentation. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, vol. 2, p.113-132.
- VAN VLIET-LANOË, B., (1989). Dynamics and extent of the Weichselian permafrost in Western Europe (stage 5e to 1). *Quaternary International*, vol. 3 (4), p. 109-114.
- VAN VLIET-LANOË, B., HALLEGOUËT, B. (2001). European permafrost at the LGM and at its maximal extent. In : R. PAEPE, V. P. MELNIKOV (Eds.), *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources*, NATO Science Series, vol. 76, p. 195-213.
- VANDENBERGHE, J., (1992). Climatic change and landscape development: an example from the past. *Catena supplement*, vol. 22, p. 73-83.
- VANDENBERGHE J., PISSART A., (1993). Permafrost changes in Europe during the last glacial. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 4, p. 121-135.
- VANDENBERGHE, J., COOPE, R., KASSE, K., (1998). Quantitative reconstructions of palaeoclimates during the last interglacial-glacial in western and central Europe: an introduction. *Journal of Quaternary Science*, vol. 13, p. 361-366.
- VANNIERE, B., (2001). *Feu, agro-pastoralisme et dynamiques environnementales en France durant l'Holocène, analyse du signal incendie, approches sédimentologiques et études de cas en Berry, Pyrénées et Franche-Comté*. Institut national agronomique, Paris-Grignon, 327 p.
- VAQUERO, M., PASTÓ, I., (2001). The Definition of Spatial Units in Middle Palaeolithic Sites: The Hearth-Related Assemblages. *Journal of Archaeological Science*, vol. 28 (11), p. 1209-1220.
- VAUGHAN, A., NICHOLS, G. J., (1995). Controls on the deposition of charcoal: implications for sedimentary accumulations of fusain. *Journal of Sedimentary Research*, vol. 65, p. 129-135.
- VERNET, J.-L., (1973). Étude sur l'histoire de la végétation du sud-est de la France au Quaternaire d'après les charbons de bois principalement. *Paléobiologie continentale*, vol. 4 (1), p. 1-90.
- VILLA, P., CASTEL, J.-C., BEAUVAL, C., BOURDILLAT, V., GOLDBERG, P., (2004). Human and carnivores sites in the European Middle and Upper Paleolithic: similarities and differences in bone modification and fragmentation. In : BRUGAL J.-P., FOSSE, P. (Eds.), *Humans and Carnivores*, Colloque de l'UISPP, Liège, septembre 2001. *Revue de Paléobiologie*, vol. 23 (2), p.705-730.
- WATTEZ, J., (1992). *Dynamique de formation des structures de combustion de la fin du Paléolithique au Néolithique moyen. Approche méthodologique et implications culturelles*. Thèse de doctorat, Université de Paris I Panthéon-Sorbonne, 2 vol. , 438 p.
- WEINER, S., SCHIEGL, S., GOLDBERG, P., BAR-YOSEF, O., (1995). Mineral assemblages in Kebara and Hayonim caves, Israel: excavation strategies, bone preservation, and wood ash remnant. *Israel Journal of Chemistry*, vol. 35, p. 143-154.

- WEINER, S., BAR-YOSEF, O., GOLDBERG, P., XU, Q., LIU, J., (2000). Evidence for the use of fire at Zhoukoudian. *Acta anthropologica Sinica suppl.*, vol. 19, p. 218-223.
- WEINER, S., GOLDBERG, P., BAR-YOSEF, O., (2002). Three-dimensional distribution of minerals in sediments of Hayonim Cave, Israel: Diagenetic processes and archaeological implications. *Journal of Archaeological Science*, vol. 29, p. 1289-1308.
- WEINER, S., BERNA, F., COHEN-OFRI, I., SHAHACK-GROSS, R., ALBERT, R.-M., KARKANAS, P., MEIGNEN, L., BAR-YOSEF, O., (2007). Mineral distribution in Kebara Cave: diagenesis and its effects on the archaeological record. In : O. BAR-YOSEF, L. MEIGNEN (Eds.), *Kebara Cave Mt Carmel, Israel. The Middle and Upper Paleolithic Archaeology*. Part I. American School of Prehistoric Research Bulletin 49, Peabody Museum of Archaeology and Ethnology, Harvard University, p. 131-144.
- WENGEL, M., KOTHE, E., SCHMIDT, C. M., HEIDE, K., GLEIXNER, G., (2006). Degradation of organic matter from black shales and charcoal by the wood-rotting fungus *Schizophyllum commune* and release of DOC and heavy metals in the aqueous phase. *Science of the Total Environment*, vol. 367 (1), p. 383-93.
- WOOD, W. R., JOHNSON, D. L., (1978). A survey of disturbance processes in archaeological site formation. *Advances in Archaeological Method and Theory*, vol. 1, p. 315-381.
- YILDIZ, S., GEZER, E. D., YILDIZ, Ü. C., (2006). Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat treatment. *Building and Environment*, vol. 41, p. 762-1766.
- ZAGWIJN, W. H., (1996). An analysis of Eemian climate in Western and Central Europe. *Quaternary Science Reviews*, vol. 15, p. 451-469.
- ZIMMERMAN, A. R., (2010). Abiotic and Microbial Oxidation of Laboratory-Produced Black Carbon (Biochar). *Environmental Science Technology*, vol. 44 (4), p. 1295-1301.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Interactions entre les paramètres incidents sur la formation et la conservation du dépôt anthracologique	27
Figure 2 : Courbe contrainte-déformation typique	83
Figure 3 : a) perte de masse volumique par température de carbonisation, b) par espèce, c) masse volumique du bois et du charbon de bois par espèce	87
Figure 4 : Valeurs moyennes des principaux indicateurs des propriétés mécaniques par température de carbonisation et par espèce : a et b) Module d'écrasement (crushing modulus : CM) ; c et d) Contrainte maximale (crushing strength : CS) ; e et f) Déformation théorique (theoretical crushing strain : TS)	88
Figure 5 : Interactions des effets température et essence sur les propriétés mécaniques. a) contrainte maximale ; b) Module d'écrasement	90
Figure 6 : Résistance spécifique par température de carbonisation et par taxon	91
Figure 7 : Nombre total de fragments : a) par température de carbonisation ; b) par classe de taille ; c) par taxon	93
Figure 8 : Différences statistiques de fragmentation entre les taxons	94
Figure 9 : Analyse de variance de la fragmentation en fonction des variables essence et température de carbonisation	95
Figure 10 : Histogramme synthétique du nombre de fragments par taxon et par température de carbonisation	96
Figure 11 : Dispersion du nombre de fragments par classe de taille pour chaque taxon.....	99
Figure 12 : Différence de fragmentation par taxon dans les trois classes de taille de fragments selon la procédure de comparaison multiple par paires (procédure de Dunn, test bilatéral)	100
Figure 13 : Graphique d'analyse des correspondances multiples intégrant les données de la fragmentation, les propriétés mécaniques des essences ainsi que leurs caractéristiques anatomiques	103
Figure 14 : Localisation du site expérimental et implantation des trois stations de mesure thermique extérieures ; la quatrième est située à l'intérieur de la cavité	121
Figure 15 : Nombre moyen de cycles gel-dégel enregistrés annuellement dans les quatre stations implantées sur le site expérimental du programme « Gavarnie »	123
Figure 16 : Localisation des dépôts de charbons de bois et disposition des cellules extérieures sur le versant sud	124
Figure 17 : Évolution de la répartition des charbons de bois dans les cellules enterrées en fonction de leur masse entre 2008 et 2010	135
Figure 18 : Masse volumique moyenne par taxon dans chacune des cellules enterrées	136
Figure 19 : Matrice des corrélations de Spearman	139
Figure 20 : Pourcentage de perte par taxon dans les trois cellules enterrées	144
Figure 21 : Pourcentage de perte par taxon dans les trois cellules de surface	144
Figure 22 : Pourcentage de fragments dispersés par taxon dans les trois cellules enterrées	145
Figure 23 : Pourcentage de fragments dispersés par taxon dans les trois cellules de surface	145

Figure 24 : Facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments par espèce en 2008 en fonction du type de dépôt	146
Figure 25 : Facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments par espèce en 2009 en fonction du type de dépôt	146
Figure 26 : Facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments par espèce en 2010 en fonction du type de dépôt	147
Figure 27 : Somme des carrés de type III. Variable « disparition »	148
Figure 28 : Graphique des coefficients normalisés relatifs à la variable « disparition »	148
Figure 29 : Sommes des carrés de type III. Variable « dispersion »	149
Figure 30 : Graphique des coefficients normalisés relatif à la variable « dispersion »	150
Figure 31 : Sommes des carrés de type III. Variable « facteur d'augmentation du nombre de fragments »	151
Figure 32 : Graphique des coefficients normalisés relatif à la variable « facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments »	151
Figure 33 : Différences significatives entre les moyennes des modalités établies par comparaisons multiples par paires (procédure de Tuckey et Bonferroni)	152
Figure 34 : Différences significatives entre les moyennes des modalités établies par comparaisons multiples par paires (procédure de Ryan-Einot-Gabriel-Welsch)	152
Figure 35 : Nombre de fragments moyen par classe de taille ([1-2mm],]2-4mm], >4mm)	153
Figure 36 : Nombre de fragments par taxon et par classe de taille dans les cellules enterrées 2008 et 2010	154
Figure 37 : Indice de fragmentation par taxon et par classe de taille dans les cellules enterrées 2008 et 2010.	156
Figure 38 : Résultat du test non paramétrique de Kruskal Wallis concernant les différences de fragmentation entre les taxons	156
Figure 39 : Comparaisons multiples par paires suivant la procédure de Dunn / Test bilatéral	157
Figure 40 : Nombre absolu de fragments >4mm par taxon et par année dans les deux types de dépôts	158
Figure 41 : Indice de fragmentation >4mm « déflaté » de la variation de masse, par taxon et par année dans les deux types de dépôts	158
Figure 42 : Résultats des tests de Kruskal Wallis relatifs aux variables « nombre de fragments >4mm » et « indice de fragmentation déflaté >4mm »	158
Figure 43 : Protocole expérimental mis en place pour tester les effets des alternances gel-dégel	163
Figure 44 : Nombre total de fragments >1mm dans les deux lots expérimentaux	168
Figure 45 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille tous taxons et lots confondus, a) toutes classes de taille, b) classes de taille supérieures]2-4mm], >4mm	168
Figure 46 : Nombre de fragments compris entre 0.5 et 1mm dans les deux lots expérimentaux	170
Figure 47 : Nombre de fragments compris entre 1 et 2mm dans les deux lots expérimentaux	170
Figure 48 : Nombre de fragments compris entre 2 et 4mm dans les deux lots expérimentaux	170
Figure 49 : Nombre de fragments >4mm dans les deux lots expérimentaux	171

Figure 50 : Test de Kruskal-Walis sur le nombre de fragments par classe de taille et par taxon ; au seuil alpha 0.05, les taxons présentent des différences significatives de fragmentation	171
Figure 51 : Comparaisons multiples par paires (procédure de Dunn, test bilatéral; Seuil de significativité corrigée de Bonferroni = 0.0005)	172
Figure 52 : Classification ascendante hiérarchique (distances euclidiennes, méthode de Ward) des taxons en fonction du nombre de fragments dans les deux classes de taille inférieures de fragments (]0.5-1mm],]1-2mm])	174
Figure 53 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (petits fragments)	175
Figure 54 : Profil des groupes (petits fragments)	175
Figure 55 : Classification ascendante hiérarchique (distances euclidiennes, méthode de Ward) des taxons en fonction du nombre de fragments dans les deux classes de taille supérieures de fragments (]2-4mm], >4mm)	176
Figure 56 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (gros fragments)	176
Figure 57 : profil des groupes (gros fragments)	177
Figure 58 : Matrice des corrélations de Spearman. Liens entre les variables (les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha = 0.05)	179
Figure 59 : Coefficients de détermination de Spearman. Liens entre les variables	179
Figure 60 : Matrice des corrélations de Spearman. Lien entre les variables incidentes et le nombre de fragments par classes de taille	181
Figure 61 : Coefficients de détermination de Spearman. Liens entre les variables incidentes et le nombre de fragments par classe de taille	181
Figure 58 : Fragmentation totale (>1mm) dans les deux cellules de la station de Levens	201
Figure 59 : Fragmentation totale dans les deux cellules de la station de Valbonne	201
Figure 60 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille dans la station de Levens	202
Figure 61 : Nombre de fragments]1-2mm] dans les deux cellules de la station de Levens.....	203
Figure 62 : Nombre de Fragments]2-4mm] dans les deux cellules de la station de Levens	203
Figure 63 : Nombre de Fragments >4mm dans les deux cellules de la station de Levens	204
Figure 64 : Test de Kruskal Walis	204
Figure 65 : Comparaisons multiples par paires. Procédure de Dunn, test bilatéral (niveau de significativité corrigée de Bonferroni = 0.0006)	205
Figure 66 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments]1-2mm] à Levens	206
Figure 67 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments]1-2mm])	207
Figure 68 : Profil des groupes (fragments]1-2mm])	207
Figure 69 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments]2-4mm]	208
Figure 70 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments]2-4mm])	208
Figure 71 : Profil des groupes (fragments]2-4mm])	209

Figure 72 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments >4mm	209
Figure 73 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments >4mm)	210
Figure 74 : Profil des groupes (fragments >4mm)	210
Figure 75 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille dans la station de Valbonne .	211
Figure 76 : Nombre de Fragments]1-2mm] dans les deux cellules de la station de Valbonne	212
Figure 77 : Nombre de Fragments]2-4mm] dans les deux cellules de la station de Valbonne	213
Figure 78 : Nombre de Fragments >4mm dans les deux cellules de la station de Valbonne	213
Figure 79 : Test de Kruskal Wallis	213
Figure 80 : Comparaisons multiples par paires (Procédure de Dunn, test bilatéral. Niveau de signification corrigée de Bonferroni : 0.0006)	214
Figure 81 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments]1-2mm]	215
Figure 82 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments]1-2mm])	215
Figure 83 : Profil des groupes (fragments]1-2mm])	216
Figure 84 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de fragments]2-4mm] et >4mm	216
Figure 85 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (fragments]2-4mm] et >4mm)	217
Figure 86 : Profil des groupes (fragments]2-4mm] et >4mm)	217
Figure 87 : Matrice des corrélations de Spearman pour la station de Levens	219
Figure 88 : Coefficients de détermination de Spearman pour la station de Levens	220
Figure 89 : Matrice des corrélations de Spearman pour la station de Valbonne	220
Figure 90 : Coefficients de détermination de Spearman pour la station de Valbonne	220
Figure 91 : Nombre total de fragments >1mm dans les deux cellules expérimentales	229
Figure 92 : Nombre de fragments par classe de taille a) toutes classes de taille de fragments (0.5 à 4mm), b) classes de taille supérieures (]2-4mm], >4mm)	230
Figure 93 : Nombre de fragments dans la classe]0.5-1mm] dans les lots 1 et 2	231
Figure 94 : Nombre de fragments dans la classe]1-2mm] dans les lots 1 et 2	232
Figure 95 : Nombre de fragments dans la classe]2-4mm] dans les lots 1 et 2	232
Figure 96 : Nombre de fragments dans la classe >4mm dans les lots 1 et 2	232
Figure 97 : Test de Kruskal-Walis (toutes classes de taille et lots de charbons compris, n = 8 par taxon)	233
Figure 98 : Différences significatives entre les taxons d'après la procédure de Dunn (comparaisons multiples par paires, test multilatéral ; niveau de signification corrigé de Bonferroni = 0.0005)	233
Figure 99 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de petits fragments produits (classes]0.5-1mm],]1-2mm])	234
Figure 100 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (petits fragments)	235

Figure 101 : Profil des groupes	235
Figure 102 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction du nombre de petits fragments produits (classes]2-4mm], >4mm)	236
Figure 103 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique (gros fragments)	236
Figure 104 : Profil des groupes	237
Figure 105 : Matrice des corrélations de Spearman	237
Figure 106 : Coefficients de détermination de Spearman	238
Figure 107 : Nombre de fragments >1mm produits à l'issue de l'expérimentation dans les deux lots d'échantillons	245
Figure 108 : Nombre de fragments par classe de taille (tous taxons et lots confondus)	246
Figure 109 : Nombre de fragments produits par l'expérimentation par lots d'échantillons dans la classe de taille]0.5-1mm]	247
Figure 110 : Nombre de fragments produits par l'expérimentation par lots d'échantillons dans la classe de taille]1-2mm]	247
Figure 111 : Nombre de fragments produits par l'expérimentation par lots d'échantillons dans la classe de taille]2-4mm]	248
Figure 112 : Nombre de fragments produits par l'expérimentation par lots d'échantillons dans la classe de taille >4mm	248
Figure 113 : Résultats du Test de Kruskal-Walis	249
Figure 114 : Comparaisons multiples par paires (Procédure de Dunn, test bilatéral. Seuil de signification de Bonferroni = 0.0006)	249
Figure 115 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction de leur nombre de fragments dans les quatre classes de taille et les deux lots expérimentaux	250
Figure 116 : Statistique descriptives des groupes mis en évidence par la CAH	251
Figure 117 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments par classe de taille (]0.5-1mm],]1-2mm],]2-4mm], >4mm)	251
Figure 118 : Matrice des corrélations de Spearman	252
Figure 119 : Coefficients de détermination	252
Figure 120 : Nombre total de fragments (classes de taille]1-2mm],]2-4mm] et >4mm) produits à l'issue de l'expérimentation par taxon dans les deux lots d'échantillons	261
Figure 121 : Nombre total de fragments (classes de taille]1-2mm],]2-4mm] et >4mm) produits à l'issue de l'expérimentation par taxon dans les deux lots d'échantillons ; les deux espèces de chêne (<i>Quercus pubescens</i> et <i>Quercus pedunculata</i>) ont été exclues	261
Figure 122 : Dispersion du nombre de fragments par classes de taille	262
Figure 123 : Nombre de fragments de la classe]1-2mm] par taxon dans les deux lots	263
Figure 124 : Nombre de fragments de la classe]2-4mm] par taxon dans les deux lots	264
Figure 125 : Nombre de fragments de la classe >4mm par taxon dans les deux lots	264
Figure 126 : Résultat du test de Kruskal-Wallis	265
Figure 127 : Comparaisons multiples par paires (procédure de Dunn, test bilatéral. Seuil de signification de Bonferroni = 0.0005)	265

Figure 128 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons (toutes espèces, classe de taille de fragments et lots inclus)	267
Figure 129 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH	267
Figure 130 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments par classe de taille dans les lots expérimentaux (1) et (2)	268
Figure 131 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons à partir du nombre de fragments de la classe]1-2mm] dans les deux lots expérimentaux (les deux espèces de chêne ont été sorties de l'analyse)	269
Figure 132 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH	269
Figure 133 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments dans les deux lots expérimentaux pour la classe]1-2mm]	270
Figure 134 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons à partir du nombre de fragments de la classe]2-4mm] dans les deux lots expérimentaux (les deux espèces de chêne ont été sorties de l'analyse)	271
Figure 135 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH	271
Figure 136 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments dans les deux lots expérimentaux pour la classe]2-4mm]	272
Figure 137 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des taxons à partir du nombre de fragments de la classe >4mm dans les deux lots expérimentaux (les deux espèces de chêne ont été sorties de l'analyse)	273
Figure 138 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH	273
Figure 139 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments dans les deux lots expérimentaux pour la classe >4mm	274
Figure 140 : Matrice des corrélations de Spearman (les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification alpha 0.05)	274
Figure 141 : Coefficients de détermination de Spearman	275
Figure 142 : Nombre total de fragments >1mm par taxon dans les deux cellules expérimentales ...	278
Figure 143 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille dans les deux cellules expérimentales (à gauche, sédiment fin ; à droite, sédiment hétérométrique)	279
Figure 144 : Nombre de fragments par taxon dans la classe]1-2mm]	281
Figure 145 : Nombre de fragments par taxon dans la classe]2-4mm]	281
Figure 146 : Nombre de fragments par taxon dans la classe >4mm	282
Figure 147 : Résultat du test de Kruskal-Wallis	282
Figure 148 : Comparaisons multiples par paires (test de Dunn, procédure bilatérale, niveau de signification corrigé de Bonferroni 0.0033)	283
Figure 149 : Classification ascendante hiérarchique des taxons en fonction de leur fragmentation	283
Figure 150 : Statistiques descriptives des groupes mis en évidence par la CAH	284
Figure 151 : Profil des groupes : nombre moyen de fragments dans les deux lots expérimentaux pour la classe >4mm	284
Figure 152 : Facteur d'augmentation du nombre total de fragments >1mm par expérimentation ..	293
Figure 153 : Facteur d'augmentation du nombre de fragments]1-2mm] par expérimentation	297
Figure 154 : Facteur d'augmentation du nombre de fragments]2-4mm] par expérimentation	297

Figure 155 : Facteur d'augmentation du nombre de fragments >4mm par expérimentation	298
Figure 156 : Distribution du facteur d'augmentation du nombre total de fragments du lot de bois A toutes expériences confondues par taxon	302
Figure 157 : Facteur d'augmentation du nombre total de fragments du lot de bois B, toutes expérience confondues, par taxon	304
Figure 158 : Tests de Kruskal Walis fondé sur le facteur d'augmentation du nombre total de fragments dans chaque classe de taille, par échantillon et par taxon	305
Figure 159 : Comparaisons multiples par paires (procédure de Dunn, test bilatéral ; seuil de signification de Bonferroni 0.0005) fondées sur le facteur d'augmentation du nombre total de fragments de chaque classe de taille par échantillon et par taxon	305
Figure 160 : Classification ascendante hiérarchique (distances euclidiennes, méthode de Ward) des taxons en fonction du facteur d'augmentation du nombre total de fragments par expérimentation	308
Figure 161 : Détail des groupes de taxons mis en évidence par la classification ascendante hiérarchique	309
Figure 162 : Profil des groupes	309
Figure 163 : Résultats de l'analyse de variance (ANOVA) de la fragmentation en fonction des facteurs « taxon » et « expérimentation »	312
Figure 164 : Proportion moyenne des fragments dans chaque classe de taille par taxon du lot de bois A	314
Figure 165 : Nombre moyen de fragments par classe de taille et par taxon du lot de bois A (les intervalles correspondent à l'erreur standard)	315
Figure 166 : Proportion moyenne des fragments dans chaque classe de taille par taxon du lot de bois B	316
Figure 167 : Distribution du nombre de fragments par classe de taille pour les taxons du lot de bois B (incluant, les cellules enfouies 2008 et 2010 de Gavarnie et l'expérimentation de piétinement de Castanet)	317
Figure 168 : Fréquences relatives des taxons du lot de bois A (en haut) et B (en bas) dans chaque classe de taille après fragmentation (calculées à partir du nombre moyen de fragments par classe de taille toutes expériences confondues). La représentation des essences varie dans les différentes classes de taille	319
Figure 169 : Mise en évidence de la variabilité intra-spécifique et intra-genre de la fragmentation des taxons. Facteur d'augmentation moyen du nombre de fragments par espèce et/ou par genre. Les intervalles correspondent à l'erreur standard	329

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Valeurs moyennes des propriétés mécaniques et de la fragmentation des 10 essences selon les trois températures de carbonisation.....	84
Tableau 2 : Masse moyenne des charbons de bois selon leur localisation (dispersés, en surface, cœur de la cellule) et erreur standard	134

Tableau 3 : Masse moyenne déposée et prélevée, pourcentage de perte de masse moyenne et nombre final moyen de fragments par type de dépôt.	136
Tableau 4 : Masse totale de charbon déposée et prélevée ; Masse prélevée >4mm et pourcentage de masse >4mm par cellule expérimentale.	137
Tableau 5 : Nombre de fragments déposés et prélevés par classe de taille ; Nombre de fragments dispersés >4mm par cellule expérimentale.	137
Tableau 6 : Taux de dispersion, de fragmentation et de disparition >4mm par cellule expérimentale	137
Tableau 7 : Facteur d'augmentation relatif du nombre de fragments >4mm par cellule expérimentale	138
Tableau 8 : Masse initiale déposée par taxon dans les cellules enterrées 2008 et 2010 en grammes	153
Tableau 9 : Nombre absolu de fragments par classe de taille, masse déposée, indice de masse (moyenne masse 11.89 = 100), indice de fragmentation par classe de taille et par taxon pour la cellule enterrée 2008	154
Tableau 10 : Nombre absolu de fragments par classe de taille, masse déposée, indice de masse (moyenne masse 10.96 = 100), indice de fragmentation par classe de taille et par taxon pour la cellule enterrée 2010	154
Tableau 11 : Teneur en carbonates, sables, limons et argiles du sédiment utilisé dans les cellules expérimentales.....	164
Tableau 12 : Nombre de fragments par classe de taille dans le lot 1	166
Tableau 13 : Nombre de fragments par classe de taille dans le lot 2	166
Tableau 14 : Statistiques descriptives de la fragmentation par classes de taille de fragments tous taxons et lots confondus	168
Tableau 15 : Données thermiques et pluviométriques. Station de Levens	195
Tableau 16 : Données thermiques et pluviométriques. Station de Sophia-Antipolis	196
Tableau 17 : Synthèse des données thermiques et pluviométriques sur le total de la période décembre 2009 - avril 2012 pour les deux stations.....	196
Tableau 18 : Nombre de fragments par classe de taille dans le premier lot de charbons déposé à Levens.....	198
Tableau 19 : Nombre de fragments par classe de taille dans le second lot de charbons déposé à Levens.....	199
Tableau 20 : Nombre de fragments par classe de taille dans le premier lot de charbons déposé à Valbonne	199
Tableau 21 : Nombre de fragments par classe de taille dans le second lot de charbons déposé à Valbonne	200
Tableau 22 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille à Levens (tous taxons et lots confondus).....	202
Tableau 23 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille à Valbonne (tous taxons et lots confondus).....	211
Tableau 24 : Nombre de fragments produits à l'issue des cycles de retrait-gonflement du sédiment dans le premier lot d'échantillons.....	227

Tableau 25 : Nombre de fragments produits à l'issue des cycles de retrait-gonflement du sédiment dans le second lot d'échantillons	228
Tableau 26 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille (tous taxons et lots confondus).....	230
Tableau 27 : Nombre de fragments par taxon et par classe de taille dans le premier lot d'échantillons	244
Tableau 28 : Nombre de fragments par taxon et par classe de taille dans le deuxième lot d'échantillons	245
Tableau 29 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille (tous taxons et lots confondus).....	246
Tableau 30 : Nombre de fragments produit à l'issue de l'expérimentation par taxon et par classe de taille dans le lot 1	259
Tableau 31 : Nombre de fragments produit à l'issue de l'expérimentation par taxon et par classe de taille dans le lot 2	259
Tableau 31 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille (tous taxons et lots confondus).....	262
Tableau 32 : Fragmentation des taxons dans la cellule 1 (sédiment fin).....	277
Tableau 33 : Fragmentation des taxons dans la cellule 2 (sédiment hétérométrique)	278
Tableau 34 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille dans la cellule 1 (sédiment fin).....	280
Tableau 35 : Statistiques descriptives du nombre de fragments par classe de taille dans la cellule 2 (sédiment hétérométrique)	280
Tableau 36 : Statistiques descriptives du facteur d'augmentation du nombre total de fragments >1mm par expérimentation	293
Tableau 37 : Statistiques descriptives du facteur d'augmentation du nombre total de fragments par taxon du lot de bois A (toutes expériences confondues, hors compressions mécaniques).....	302
Tableau 38 : Statistiques descriptives du facteur d'augmentation du nombre total de fragments par taxon pour le lot de bois B	304

LISTE DES PLANCHES

Planche 1 : Éléments communs des divers protocoles expérimentaux	58
Planche 2 : Comptage des fragments par analyse d'image	60
Planche 3 : Mesure de la porosité par analyse d'image	61

RÉSUMÉ

Dans les gisements paléolithiques, les résidus anthracologiques étudiables sont parfois très abondants ou, au contraire, quasiment absents, sans relation évidente avec l'intensité des activités liées au feu. Ce constat pose la question de l'impact des processus post-dépositionnels, dont l'action est particulièrement importante dans les sites anciens. Lorsque la fraction grossière est rare, les charbons méso ou microscopiques sont souvent bien représentés, mettant en lumière un intense processus de fragmentation. Agent majeur de la formation des assemblages, la fragmentation conditionne le niveau de conservation du dépôt, mais aussi éventuellement la représentation quantitative des taxons.

Dans une perspective méthodologique et au moyen d'une série d'expérimentation *in vivo* et *in vitro* (tests de compression, cycles gel-dégel, piétinement, retrait-gonflement du sédiment, etc.), les propriétés physico-mécaniques des charbons de bois et les modalités de fragmentation de différents taxons d'Europe tempérée sont caractérisées. Un ensemble de processus post-dépositionnels qui participent de la formation de nombreux dépôts du Pléistocène sont simulés de manière à mesurer leur impact sur le matériel anthracologique.

Nos résultats montrent que les charbons de bois sont particulièrement sensibles aux processus météoriques et aux phénomènes périglaciaires ainsi qu'au piétinement. Le niveau de fragmentation des charbons laisse envisager l'ampleur des dommages causés sur la longue durée. Les propriétés physico-mécaniques et le comportement à la fragmentation des charbons de bois varient selon les essences. Ces différences s'expriment au niveau générique, spécifique et plus ponctuellement intra-spécifique, mais elles ne semblent pas de nature à induire des distorsions quantitatives majeures de la représentation initiale des taxons au sein des assemblages. Enfin, lorsque des différences entre taxons sont mises en évidence, elles s'expriment principalement au sein de la fraction fine (charbons compris entre 1 et 2 mm), laquelle est rarement étudiée en termes quantitatif.

Mots-clés : Méthodologie, Anthracologie, Paléolithique, taphonomie, fragmentation, expérimentation, représentativité des assemblages

ABSTRACT

Anthracological residues are often either very abundant or almost entirely absent in Palaeolithic sites, with no obvious relationship between their quantity and in the intensity of fire-related activities that may have occurred. This raises the question of the impact of post-depositional processes on anthracological residues, which is especially significant at ancient sites. When the coarse fraction is rare, meso and microscopic charcoal are often well represented, highlighting an intense process of fragmentation. As a major agent of the assemblages' formation, fragmentation affects the level of conservation of the deposit, but also possibly the quantitative representation of taxa.

From a methodological perspective and through a series of *in vivo* and *in vitro* experiments, the physico-mechanical properties of charcoal and the modalities of fragmentation of Europe temperate taxa are characterized. A set of post-depositional processes (freeze-thaw cycles, trampling, sediment shrinking and swelling, etc.), involved in the formation of many Pleistocene deposits, are simulated in order to measure their impact on anthracological residues.

The results of this research show that charcoal is particularly sensitive to meteoric and periglacial processes as well as trampling. The level of fragmentation of charcoal makes it possible to consider the scale of damage caused over a long term exposure of the remains. The physico-mechanical properties and the fragmentation behavior of charcoal vary depending on the species. These differences are visible on a generic, specific and intra-specific level, though they do not seem to induce major distortions of the initial quantitative representation of taxa within assemblages. Finally, when differences between taxa are identified, they are mainly recovered in the fine fraction (charcoal between 1 and 2 mm), which is rarely studied in quantitative terms.

Keywords: methodology, anthracology, Palaeolithic, taphonomy, fragmentation, experimentation, representativeness of assemblages

ANNEXES

TABLE DES MATIÈRES

I. Mesures de porosité par analyse d'image et masse volumique des charbons de bois par taxon	396
II. Annexes du chapitre III	398
III. Annexes du chapitre IV	403
III.1. Essai de dépôt en milieu périglaciaire actuel	403
III.1.1. Tests statistiques	409
III.1.1.1. Dispersion des charbons de bois selon les modalités « taxons », « type de dépôt », « durée de dépôt » ; comparaisons multiples par paires	409
III.1.1.2. Disparition des charbons de bois selon les modalités « taxons », « type de dépôt », « durée de dépôt » ; comparaisons multiples par paires	415
III.1.1.3. Fragmentation des charbons de bois selon les modalités « taxons », « type de dépôt », « durée de dépôt »	421
III.2.1. Homogénéité de la fragmentation des lots	428
III.3. Aspect macroscopique du bois de <i>Pinus sylvestris</i> altéré	430
III.4. Lien entre fragmentation, masse volumique et porosité	431
IV. Annexes du chapitre V.	433
IV.1. Essai de météorisation	433
IV.1.1. Homogénéité de la fragmentation des lots	434
IV.1.2. Relation entre fragmentation, porosité et volume initial des fragments	436
IV.2. Essai d'alternances de retrait-gonflement du sédiment	438
IV.3. Essai d'imbibition-dessiccation des charbons de bois	441
IV.3.1. Homogénéité de la fragmentation des lots	441
IV.3.2. Relation entre fragmentation et porosité globale	443
IV.4. Essais de piétinement	444
IV.4.1. Homogénéité de la fragmentation des lots de l'expérience 1	445
IV.4.3. Homogénéité de la fragmentation entre les deux cellules de l'expérience 2	447
V. Annexes du chapitre VI.	449
V.1. Histogrammes de fragmentation	449
LISTE DES FIGURES PRÉSENTÉES EN ANNEXES	455
LISTE DES PLANCHES PRÉSENTÉES EN ANNEXES	459

I. MESURES DE POROSITÉ PAR ANALYSE D'IMAGE ET MASSE VOLUMIQUE DES CHARBONS DE BOIS PAR TAXON

Figure 1 : Mesures moyennes de la masse volumique des taxons (combustions en foyer ouvert uniquement, toutes expérimentations confondues)

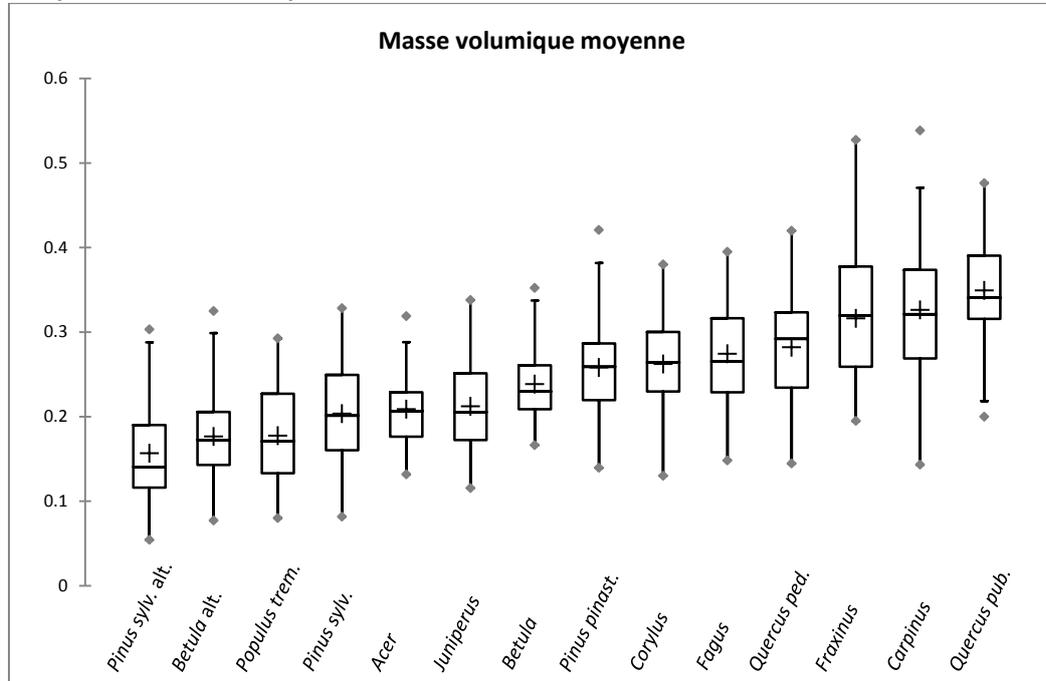


Figure 2 : Indice de porosité correspondant au rapport entre porosité du bois final et porosité du bois initial (cet indice met en évidence une zone poreuse plus ou moins marquée)

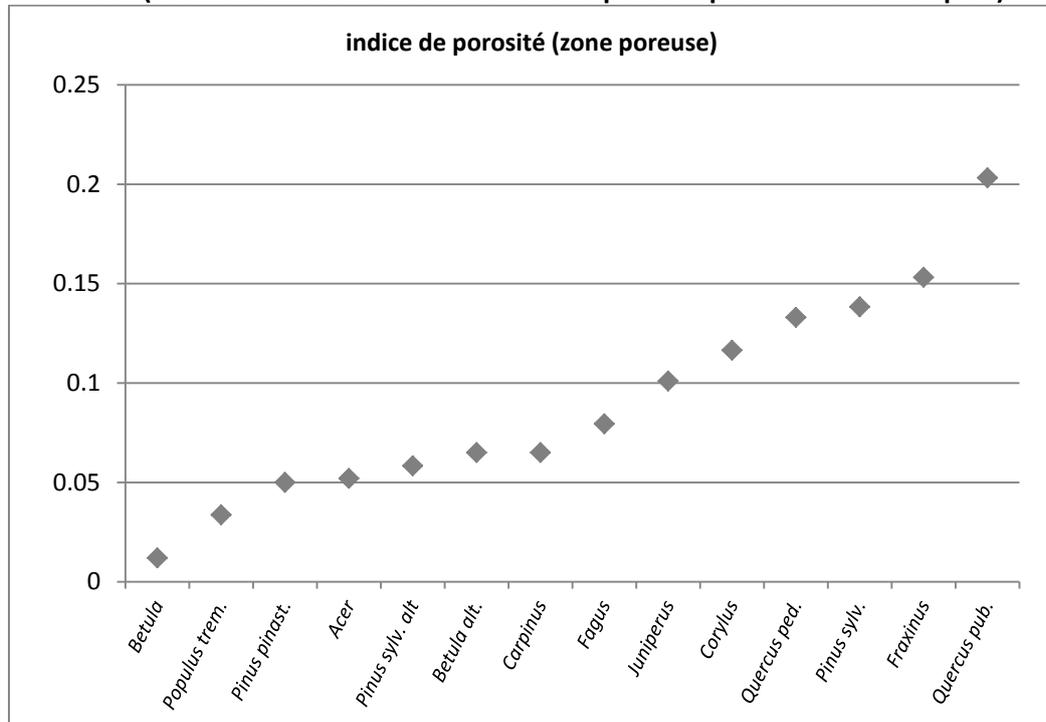
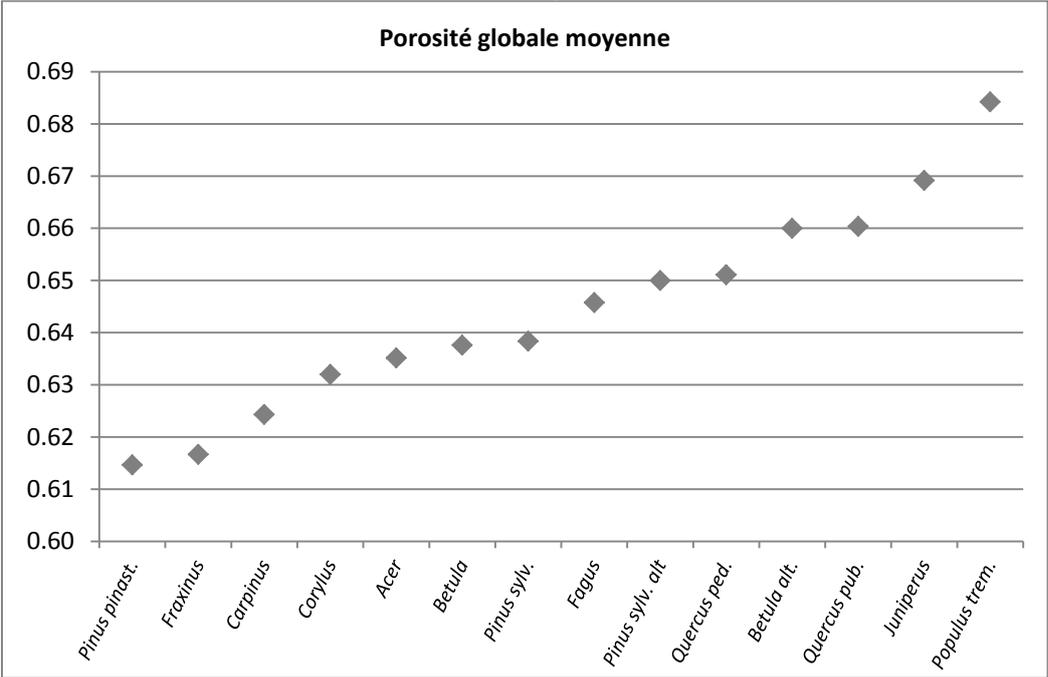


Figure 3 : Indice de porosité globale moyenne des taxons (bois initial et bois final confondus : l'indice mesure les zones de vides à l'échelle globale de l'échantillon)



I. ANNEXES DU CHAPITRE III



Planche 1' : Préparation des échantillons destinés à la caractérisation des propriétés mécaniques des charbons de bois et premiers tests de compression

**Figure 4 : Différences significatives de fragmentation des taxons (nombre total de fragments).
Table des p-values (les valeurs en gras sont inférieures au seuil de signification de Bonferroni = 0.0011)**

	Acer	Betula	Carpinus	Corylus	Fagus	Fraxinus	Pinus p.	Pinus s.	Populus	Quercus p.
Acer	1	0.998	0.005	0.030	0.002	0.000	0.695	0.893	< 0.0001	< 0.0001
Betula	0.998	1	0.005	0.030	0.002	0.000	0.693	0.896	< 0.0001	< 0.0001
Carpinus	0.005	0.005	1	0.516	< 0.0001	0.328	0.001	0.007	< 0.0001	0.037
Corylus	0.030	0.030	0.516	1	< 0.0001	0.104	0.010	0.041	< 0.0001	0.006
Fagus	0.002	0.002	< 0.0001	< 0.0001	1	< 0.0001	0.006	0.001	0.233	< 0.0001
Fraxinus	0.000	0.000	0.328	0.104	< 0.0001	1	< 0.0001	0.000	< 0.0001	0.267
Pinus p.	0.695	0.693	0.001	0.010	0.006	< 0.0001	1	0.599	< 0.0001	< 0.0001
Pinus s.	0.893	0.896	0.007	0.041	0.001	0.000	0.599	1	< 0.0001	< 0.0001
Populus	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.233	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	1	< 0.0001
Quercus	< 0.0001	< 0.0001	0.037	0.006	< 0.0001	0.267	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	1

Figure 5 : Test de Kruskal Wallis relatif à la fragmentation des taxons dans la classe de taille [1-2mm] (n= 29 par échantillon).

K (Valeur observée)	167.814
K (Valeur critique)	16.919
DDL	9
p-value (bilatérale)	< 0.0001
alpha	0.05

La p-value est inférieure au seuil alpha 0.05 : les taxons appartiennent à des populations statistiques différentes.

Figure 6 : Test de Kruskal Wallis relatif à la fragmentation des taxons dans la classe de taille [2-4mm] (n= 29 par échantillon).

K (Valeur observée)	113.934
K (Valeur critique)	16.919
DDL	9
p-value (bilatérale)	< 0.0001
alpha	0.05

La p-value est inférieure au seuil alpha 0.05 : les taxons appartiennent à des populations statistiques différentes.

Figure 7 : Test de Kruskal Wallis relatif à la fragmentation des taxons dans la classe de taille >4mm (n= 29 par échantillon).

K (Valeur observée)	89.715
K (Valeur critique)	16.919
DDL	9
p-value (bilatérale)	< 0.0001
alpha	0.05

La p-value est inférieure au seuil alpha 0.05 : les taxons appartiennent à des populations statistiques différentes.

Figure 8 : Différences statistiquement significatives de fragmentation des taxons par classe de taille de fragments déterminées par comparaisons multiples par paires (procédure de Dunn). Seuil de signification de Bonferroni = 0.0011.

]1-2mm]

	Acer	Betula	Carpinus	Corylus	Fagus	Fraxinus	Pinus p.	Pinus s.	Populus	Quercus
Acer	1	0.029	< 0.0001	0.000	0.021	< 0.0001	0.648	0.768	0.001	< 0.0001
Betula	0.029	1	0.005	0.118	< 0.0001	0.003	0.008	0.059	< 0.0001	0.061
Carpinus	< 0.0001	0.005	1	0.223	< 0.0001	0.839	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.360
Corylus	0.000	0.118	0.223	1	< 0.0001	0.155	< 0.0001	0.001	< 0.0001	0.760
Fagus	0.021	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	1	< 0.0001	0.065	0.009	0.256	< 0.0001
Fraxinus	< 0.0001	0.003	0.839	0.155	< 0.0001	1	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.264
Pinus p.	0.648	0.008	< 0.0001	< 0.0001	0.065	< 0.0001	1	0.452	0.003	< 0.0001
Pinus s.	0.768	0.059	< 0.0001	0.001	0.009	< 0.0001	0.452	1	0.000	0.000
Populus	0.001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.256	< 0.0001	0.003	0.000	1	< 0.0001
Quercus	< 0.0001	0.061	0.360	0.760	< 0.0001	0.264	< 0.0001	0.000	< 0.0001	1

]2-4mm]

	Acer	Betula	Carpinus	Corylus	Fagus	Fraxinus	Pinus p.	Pinus s.	Populus	Quercus
Acer	1	< 0.0001	0.001	0.094	0.000	0.390	0.516	0.517	< 0.0001	0.003
Betula	< 0.0001	1	0.171	0.003	0.414	0.000	< 0.0001	< 0.0001	0.362	< 0.0001
Carpinus	0.001	0.171	1	0.118	0.581	0.017	0.010	0.010	0.023	< 0.0001
Corylus	0.094	0.003	0.118	1	0.034	0.415	0.305	0.305	0.000	< 0.0001
Fagus	0.000	0.414	0.581	0.034	1	0.003	0.002	0.002	0.084	< 0.0001
Fraxinus	0.390	0.000	0.017	0.415	0.003	1	0.833	0.833	< 0.0001	0.000
Pinus p.	0.516	< 0.0001	0.010	0.305	0.002	0.833	1	0.999	< 0.0001	0.000
Pinus s.	0.517	< 0.0001	0.010	0.305	0.002	0.833	0.999	1	< 0.0001	0.000
Populus	< 0.0001	0.362	0.023	0.000	0.084	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	1	< 0.0001
Quercus	0.003	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.000	0.000	0.000	< 0.0001	1

>4mm

	Acer	Betula	Carpinus	Corylus	Fagus	Fraxinus	Pinus p.	Pinus s.	Populus	Quercus
Acer	1	0.022	0.175	0.032	0.116	0.199	0.283	0.949	0.005	< 0.0001
Betula	0.022	1	0.352	0.890	0.476	0.316	0.001	0.026	0.601	< 0.0001
Carpinus	0.175	0.352	1	0.428	0.827	0.943	0.015	0.196	0.146	< 0.0001
Corylus	0.032	0.890	0.428	1	0.566	0.387	0.001	0.037	0.509	< 0.0001
Fagus	0.116	0.476	0.827	0.566	1	0.772	0.008	0.131	0.217	< 0.0001
Fraxinus	0.199	0.316	0.943	0.387	0.772	1	0.018	0.222	0.127	< 0.0001
Pinus p.	0.283	0.001	0.015	0.001	0.008	0.018	1	0.256	0.000	0.000
Pinus s.	0.949	0.026	0.196	0.037	0.131	0.222	0.256	1	0.006	< 0.0001
Populus	0.005	0.601	0.146	0.509	0.217	0.127	0.000	0.006	1	< 0.0001
Quercus	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	0.000	< 0.0001	< 0.0001	1

Figure 9 : Table récapitulative des résultats des tests de Spearman mentionnés dans le texte

Variables		Correlation coef. (Rhô)	p-value	Determination coef.
Masse volumique bois (WD)	Masse volumique charbon (WCD)	0.708	< 0.0001	0.501
Total Nb fragt	Masse volumique bois (WD)	0.517	< 0.0001	0.267
Total Nb fragt	Masse volumique charbon (WCD)	0.433	< 0.0001	0.188
Total Nb fragt	Module d'écrasement (CM)	0.170	0.003	0.029
Total Nb fragt	Contrainte maximale (CS)	0.070	0.225	0.005
Total Nb fragt	Résistance spécifique (CS/WCD)	-0.090	0.120	0.008
Total Nb fragt	(Perte de Densité) Dloss	0.019	0.739	0.000
Nb fragt [1-2mm]	Masse volumique bois (WD)	0.496	< 0.0001	0.246
Nb fragt [1-2mm]	Masse volumique charbon (WCD)	0.464	< 0.0001	0.215
CM	Masse volumique charbon (WCD)	0.516	< 0.0001	0.266
CM	(Perte de Densité) Dloss	-0.587	< 0.0001	0.344
CS	Masse volumique charbon (WCD)	0.404	< 0.0001	0.163
CS	(Perte de Densité) Dloss	-0.671	< 0.0001	0.451

II. ANNEXES DU CHAPITRE IV

III.1. Essai de dépôt en milieu périglaciaire actuel



Planche 1 : Dépôt des cellules expérimentales et détails d'une des cellules de la grotte du Névé et du dépôt témoin extérieur



Planche 2 : 1) Vue générale du versant, 2) Grotte du Névé, 3) Vue de la zone expérimentale en sept. 2008, encore sous la neige, 4) station météo réinstallée en 2007, 5) gélifraction des blocs avec structuration, les particules fines sont au centre et les plus grossières à la périphérie, 6) Fond d'un petit lac temporaire au pied de la grotte dans lequel se développe un réseau polygonal de fentes de cryodessiccation, 7) réseau de polygone à proximité des cellules expérimentale, les parois sont recolonisées par la végétation, 8) détail du réseau de polygone du fond du lac.

	Dépôt	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4
Cellule 1					prélèvement année 3
Cellule 2				prélèvement année 2	prélèvement année 2
Cellule 3				prélèvement année 2	prélèvement année 2
Cellule 4					prélèvement année 3

Planche 3 : Vues année par années des cellules expérimentales 1 à 4

	Dépôt	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	
Cellule 3'						Prélèvement année 4
Cellule 4'						Prélèvement année 4
Cellule 1'			pas de photos			Encore en place
Cellule 2'			pas de photos	Prélèvement année 2	Prélèvement année 2	Prélèvement année 2
Cellule témoin						Encore en place

Planche 4 : Vues année par année des cellules expérimentales 1' à 4' et cellule témoin

Cellule de surface 3'



Dépôt en surface



Aspect année 1
et détail



Aspect année 2



Détail année 3



Aspect année 3



Détail année 4



Aspect année 4

Planche 5 : Détail de la cellule 3'

Cellule enterrée 4'



Dépôt des charbons dans le surcreusement



Recouvrement des charbons



Aspect année 1



Aspect année 2



Aspect année 3



Détail année 1



Détail année 3



Aspect année 4



Prélèvement

Planche 6 : Détail de la cellule 4'

III.1.1. Tests statistiques

III.1.1.1. Dispersion des charbons de bois selon les modalités « taxons », « type de dépôt », « durée de dépôt » ; comparaisons multiples par paires

Modalité espèce :

Figure 10 : Test de Tukey (HSD) / Espèce : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
Pinus vs Populus	-0.134	-2.616	3.064	0.128	Non
Pinus vs Carpinus	-0.075	-1.465	3.064	0.688	Non
Pinus vs Betula	-0.048	-0.930	3.064	0.935	Non
Pinus vs Corylus	-0.032	-0.617	3.064	0.989	Non
Pinus vs Quercus	-0.012	-0.240	3.064	1.000	Non
Quercus vs Populus	-0.121	-2.376	3.064	0.200	Non
Quercus vs Carpinus	-0.063	-1.226	3.064	0.821	Non
Quercus vs Betula	-0.035	-0.690	3.064	0.982	Non
Quercus vs Corylus	-0.019	-0.378	3.064	0.999	Non
Corylus vs Populus	-0.102	-1.998	3.064	0.369	Non
Corylus vs Carpinus	-0.043	-0.848	3.064	0.955	Non
Corylus vs Betula	-0.016	-0.313	3.064	1.000	Non
Betula vs Populus	-0.086	-1.686	3.064	0.552	Non
Betula vs Carpinus	-0.027	-0.536	3.064	0.994	Non
Carpinus vs Populus	-0.059	-1.150	3.064	0.856	Non
Valeur critique du d de Tukey :			4.333		

Figure 11 : Différences significatives espèces

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Pinus	0.194	A
Quercus	0.206	A
Corylus	0.225	A
Betula	0.241	A
Carpinus	0.269	A
Populus	0.328	A

Figure 12 : Test de Bonferroni / Espèce : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
Pinus vs Populus	-0.134	-2.616	3.219	0.014	Non
Pinus vs Carpinus	-0.075	-1.465	3.219	0.154	Non
Pinus vs Betula	-0.048	-0.930	3.219	0.361	Non
Pinus vs Corylus	-0.032	-0.617	3.219	0.542	Non
Pinus vs Quercus	-0.012	-0.240	3.219	0.812	Non
Quercus vs Populus	-0.121	-2.376	3.219	0.025	Non
Quercus vs Carpinus	-0.063	-1.226	3.219	0.231	Non
Quercus vs Betula	-0.035	-0.690	3.219	0.496	Non
Quercus vs Corylus	-0.019	-0.378	3.219	0.709	Non
Corylus vs Populus	-0.102	-1.998	3.219	0.056	Non
Corylus vs Carpinus	-0.043	-0.848	3.219	0.404	Non
Corylus vs Betula	-0.016	-0.313	3.219	0.757	Non
Betula vs Populus	-0.086	-1.686	3.219	0.103	Non
Betula vs Carpinus	-0.027	-0.536	3.219	0.597	Non
Carpinus vs Populus	-0.059	-1.150	3.219	0.260	Non
Niveau de signification corrigé :			0.003		

Figure 13 : Différences significatives espèces

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Pinus	0.194	A
Quercus	0.206	A
Corylus	0.225	A
Betula	0.241	A
Carpinus	0.269	A
Populus	0.328	A

Figure 14 : Test REGWQ / Espèce : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)	Significatif
Pinus vs Populus	-0.134	-2.616	3.064	0.128	0.050	Non
Pinus vs Carpinus	-0.075	-1.465	2.921	0.593	0.050	Non
Pinus vs Betula	-0.048	-0.930	2.921	0.789	0.050	Non
Pinus vs Corylus	-0.032	-0.617	2.921	0.812	0.050	Non
Pinus vs Quercus	-0.012	-0.240	2.921	0.812	0.050	Non
Quercus vs Populus	-0.121	-2.376	2.921	0.153	0.050	Non
Quercus vs Carpinus	-0.063	-1.226	2.915	0.616	0.034	Non
Quercus vs Betula	-0.035	-0.690	2.915	0.771	0.034	Non
Quercus vs Corylus	-0.019	-0.378	2.915	0.709	0.034	Non
Corylus vs Populus	-0.102	-1.998	2.915	0.214	0.034	Non
Corylus vs Carpinus	-0.043	-0.848	2.786	0.677	0.025	Non
Corylus vs Betula	-0.016	-0.313	2.786	0.757	0.025	Non
Betula vs Populus	-0.086	-1.686	2.786	0.229	0.025	Non
Betula vs Carpinus	-0.027	-0.536	2.545	0.597	0.017	Non
Carpinus vs Populus	-0.059	-1.150	2.545	0.260	0.017	Non

Figure 15 : Différences significatives espèces

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Pinus	0.194	A
Quercus	0.206	A
Corylus	0.225	A
Betula	0.241	A
Carpinus	0.269	A
Populus	0.328	A

Figure 16 : Test de Dunnett (bilatéral) / Espèce : Analyse des différences entre la modalité témoin Espèce-Betula et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Modalité	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence critique	Pr > Diff	Significatif
Betula vs Pinus	0.048	0.930	2.674	0.137	0.818	Non
Betula vs Quercus	0.035	0.690	2.674	0.137	0.934	Non
Betula vs Corylus	0.016	0.313	2.674	0.137	0.998	Non
Betula vs Populus	-0.086	-1.686	2.674	0.137	0.332	Non
Betula vs Carpinus	-0.027	-0.536	2.674	0.137	0.976	Non

Modalité type de dépôt :

Figure 17 : Test de Tukey (HSD) / Type de dépôt : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
enterré vs surface	-0.279	-9.451	2.052	< 0.0001	Oui
Valeur critique du d de Tukey :			2.902		

Figure 18 : Différences significatives type de dépôt

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
enterré	0.104	A
surface	0.383	B

Figure 19 : Test de Bonferroni /Type de dépôt : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
enterré vs surface	-0.279	-9.451	2.052	< 0.0001	Oui
Niveau de signification corrigé :			0.05		

Figure 20 : Différences significatives type de dépôt

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
enterré	0.104	A
surface	0.383	B

Figure 21 : Test REGWQ /Type de dépôt : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)	Significatif
enterré vs surface	-0.279	-9.451	2.052	< 0.0001	0.050	Oui

Figure 22 : Différences significatives type de dépôt

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
enterré	0.104	A
surface	0.383	B

Figure 23 : Test de Dunnett (bilatéral) / Type de dépôt : Analyse des différences entre la modalité témoin Modalité-enterré et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Modalité	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence critique	Pr > Diff	Significatif
enterré vs surface	-0.279	-9.451	2.052	0.061	0.000	Oui

Modalité année :

Figure 24 : Test de Tukey (HSD) / Année : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
2008 vs 2010	-0.162	-4.478	2.480	0.000	Oui
2008 vs 2009	-0.027	-0.759	2.480	0.731	Non
2009 vs 2010	-0.134	-3.719	2.480	0.003	Oui

Valeur critique du d de Tukey : 3.507

Figure 25 : Différences significatives années

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
2008	0.181	A
2009	0.208	A
2010	0.343	B

Figure 26 : Test de Bonferroni / Année : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
2008 vs 2010	-0.162	-4.478	2.552	0.000	Oui
2008 vs 2009	-0.027	-0.759	2.552	0.454	Non
2009 vs 2010	-0.134	-3.719	2.552	0.001	Oui

Niveau de signification corrigé : 0.017

Figure 27 : Différences significatives années

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
2008	0.181	A
2009	0.208	A
2010	0.343	B

Figure 28 : Test REGWQ / Année : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)
2008 vs 2010	-0.162	-4.478	2.480	0.000	0.050
2008 vs 2009	-0.027	-0.759	2.052	0.454	0.050
2009 vs 2010	-0.134	-3.719	2.052	0.001	0.050

Figure 29 : Différences significatives années

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
2008	0.181	A
2009	0.208	A
2010	0.343	B

Figure 30 : Test de Dunnett (bilatéral) / Année : Analyse des différences entre la modalité témoin Année-2008 et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Modalité	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence critique	Pr > Diff
2008 vs 2010	-0.162	-4.478	2.333	0.084	0.000
2008 vs 2009	-0.027	-0.759	2.333	0.084	0.670

III.1.1.2. Disparition des charbons de bois selon les modalités « taxons », « type de dépôt », « durée de dépôt » ; comparaisons multiples par paires

Modalité espèce :

Figure 31 : Test de Tukey (HSD) / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
Pinus vs Populus	-0.134	-2.616	3.064	0.128	Non
Pinus vs Carpinus	-0.075	-1.465	3.064	0.688	Non
Pinus vs Betula	-0.048	-0.930	3.064	0.935	Non
Pinus vs Corylus	-0.032	-0.617	3.064	0.989	Non
Pinus vs Quercus	-0.012	-0.240	3.064	1.000	Non
Quercus vs Populus	-0.121	-2.376	3.064	0.200	Non
Quercus vs Carpinus	-0.063	-1.226	3.064	0.821	Non
Quercus vs Betula	-0.035	-0.690	3.064	0.982	Non
Quercus vs Corylus	-0.019	-0.378	3.064	0.999	Non
Corylus vs Populus	-0.102	-1.998	3.064	0.369	Non
Corylus vs Carpinus	-0.043	-0.848	3.064	0.955	Non
Corylus vs Betula	-0.016	-0.313	3.064	1.000	Non
Betula vs Populus	-0.086	-1.686	3.064	0.552	Non
Betula vs Carpinus	-0.027	-0.536	3.064	0.994	Non
Carpinus vs Populus	-0.059	-1.150	3.064	0.856	Non
Valeur critique du d de Tukey :			4.333		

Figure 32 : Différences significatives taxons

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Pinus	0.194	A
Quercus	0.206	A
Corylus	0.225	A
Betula	0.241	A
Carpinus	0.269	A
Populus	0.328	A

Figure 33 : Test de Bonferroni / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
Pinus vs Populus	-0.134	-2.616	3.219	0.014	Non
Pinus vs Carpinus	-0.075	-1.465	3.219	0.154	Non
Pinus vs Betula	-0.048	-0.930	3.219	0.361	Non
Pinus vs Corylus	-0.032	-0.617	3.219	0.542	Non
Pinus vs Quercus	-0.012	-0.240	3.219	0.812	Non
Quercus vs Populus	-0.121	-2.376	3.219	0.025	Non
Quercus vs Carpinus	-0.063	-1.226	3.219	0.231	Non
Quercus vs Betula	-0.035	-0.690	3.219	0.496	Non
Quercus vs Corylus	-0.019	-0.378	3.219	0.709	Non
Corylus vs Populus	-0.102	-1.998	3.219	0.056	Non
Corylus vs Carpinus	-0.043	-0.848	3.219	0.404	Non
Corylus vs Betula	-0.016	-0.313	3.219	0.757	Non
Betula vs Populus	-0.086	-1.686	3.219	0.103	Non
Betula vs Carpinus	-0.027	-0.536	3.219	0.597	Non
Carpinus vs Populus	-0.059	-1.150	3.219	0.260	Non
Niveau de signification corrigé :			0.003		

Figure 34 : Différences significatives taxons

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Pinus	0.194	A
Quercus	0.206	A
Corylus	0.225	A
Betula	0.241	A
Carpinus	0.269	A
Populus	0.328	A

Figure 35 : Test REGWQ / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)	Significatif
Pinus vs Populus	-0.134	-2.616	3.064	0.128	0.050	Non
Pinus vs Carpinus	-0.075	-1.465	2.921	0.593	0.050	Non
Pinus vs Betula	-0.048	-0.930	2.921	0.789	0.050	Non
Pinus vs Corylus	-0.032	-0.617	2.921	0.812	0.050	Non
Pinus vs Quercus	-0.012	-0.240	2.921	0.812	0.050	Non
Quercus vs Populus	-0.121	-2.376	2.921	0.153	0.050	Non
Quercus vs Carpinus	-0.063	-1.226	2.915	0.616	0.034	Non
Quercus vs Betula	-0.035	-0.690	2.915	0.771	0.034	Non
Quercus vs Corylus	-0.019	-0.378	2.915	0.709	0.034	Non
Corylus vs Populus	-0.102	-1.998	2.915	0.214	0.034	Non
Corylus vs Carpinus	-0.043	-0.848	2.786	0.677	0.025	Non
Corylus vs Betula	-0.016	-0.313	2.786	0.757	0.025	Non
Betula vs Populus	-0.086	-1.686	2.786	0.229	0.025	Non
Betula vs Carpinus	-0.027	-0.536	2.545	0.597	0.017	Non
Carpinus vs Populus	-0.059	-1.150	2.545	0.260	0.017	Non

Figure 36 : Différences significatives taxons

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
Pinus	0.194	A
Quercus	0.206	A
Corylus	0.225	A
Betula	0.241	A
Carpinus	0.269	A
Populus	0.328	A

Figure 37 : Test de Dunnett (bilatéral) / Espèce ; Analyse des différences entre la modalité témoin Espèce-Betula et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Modalité	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence critique	Pr > Diff	Significatif
Betula vs Pinus	0.048	0.930	2.674	0.137	0.818	Non
Betula vs Quercus	0.035	0.690	2.674	0.137	0.934	Non
Betula vs Corylus	0.016	0.313	2.674	0.137	0.998	Non
Betula vs Populus	-0.086	-1.686	2.674	0.137	0.332	Non
Betula vs Carpinus	-0.027	-0.536	2.674	0.137	0.976	Non

Modalité type de dépôt :

Figure 38 : test de Tukey (HSD) / type de dépôt ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
enterré vs surface	-0.279	-9.451	2.052	< 0.0001	Oui
Valeur critique du d de Tukey :			2.902		

Figure 39 : Différences significatives type de dépôt

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
enterré	0.104	A
surface	0.383	B

Figure 40 : Test de Bonferroni / type de dépôt ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
enterré vs surface	-0.279	-9.451	2.052	< 0.0001	Oui
Niveau de signification corrigé :			0.05		

Figure 41 : Différences significatives type de dépôt

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
enterré	0.104	A
surface	0.383	B

Figure 42 : Test REGWQ / type de dépôt ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)	Significatif
enterré vs surface	-0.279	-9.451	2.052	< 0.0001	0.050	Oui

Figure 43 : Différences significatives type de dépôt

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
enterré	0.104	A
surface	0.383	B

Figure 44 : Test de Dunnett (bilatéral) / type de dépôt ; Analyse des différences entre la modalité témoin Modalité-enterré

Modalité	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence critique	Pr > Diff	Significatif
enterré vs surface	-0.279	-9.451	2.052	0.061	0.000	Oui

Modalité année :**Figure 45 : Test de Tukey (HSD) / Année ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :**

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
2008 vs 2010	-0.162	-4.478	2.480	0.000	Oui
2008 vs 2009	-0.027	-0.759	2.480	0.731	Non
2009 vs 2010	-0.134	-3.719	2.480	0.003	Oui
Valeur critique du d de Tukey :			3.507		

Figure 46 : Différences significatives années

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
2008	0.181	A
2009	0.208	A
2010	0.343	B

Figure 47 : Test de Bonferroni / Années ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
2008 vs 2010	-0.162	-4.478	2.552	0.000	Oui
2008 vs 2009	-0.027	-0.759	2.552	0.454	Non
2009 vs 2010	-0.134	-3.719	2.552	0.001	Oui
Niveau de signification corrigé :			0.017		

Figure 48 : Différences significatives années

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
2008	0.181	A
2009	0.208	A
2010	0.343	B

Figure 49 : Test REGWQ / Année ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)	Significatif
2008 vs 2010	-0.162	-4.478	2.480	0.000	0.050	Oui
2008 vs 2009	-0.027	-0.759	2.052	0.454	0.050	Non
2009 vs 2010	-0.134	-3.719	2.052	0.001	0.050	Oui

Figure 50 : Différences significatives années

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
2008	0.181	A
2009	0.208	A
2010	0.343	B

Figure 51 : Test de Dunnett (bilatéral) / Année ; Analyse des différences entre la modalité témoin Année-2008 et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Modalité	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence critique	Pr > Diff	Significatif
2008 vs 2010	-0.162	-4.478	2.333	0.084	0.000	Oui
2008 vs 2009	-0.027	-0.759	2.333	0.084	0.670	Non

III.1.1.3. Fragmentation des charbons de bois selon les modalités « taxons », « type de dépôt », « durée de dépôt »

Modalité espèce :

Figure 52 : Test de Tukey (HSD) / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
Pinus vs Corylus	-7.206	-3.581	3.064	0.015	Oui
Pinus vs Populus	-5.914	-2.939	3.064	0.066	Non
Pinus vs Carpinus	-4.358	-2.166	3.064	0.286	Non
Pinus vs Betula	-3.671	-1.824	3.064	0.468	Non
Pinus vs Quercus	-0.017	-0.008	3.064	1.000	Non
Quercus vs Corylus	-7.189	-3.572	3.064	0.015	Oui
Quercus vs Populus	-5.897	-2.930	3.064	0.067	Non
Quercus vs Carpinus	-4.342	-2.157	3.064	0.290	Non
Quercus vs Betula	-3.655	-1.816	3.064	0.473	Non
Betula vs Corylus	-3.535	-1.756	3.064	0.509	Non
Betula vs Populus	-2.243	-1.114	3.064	0.871	Non
Betula vs Carpinus	-0.687	-0.341	3.064	0.999	Non
Carpinus vs Corylus	-2.847	-1.415	3.064	0.718	Non
Carpinus vs Populus	-1.556	-0.773	3.064	0.970	Non
Populus vs Corylus	-1.292	-0.642	3.064	0.987	Non
Valeur critique du d de Tukey :			4.333		

Figure 53 : Différences significatives taxons

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
Pinus	6.029	A	
Quercus	6.046	A	
Betula	9.700	A	B
Carpinus	10.387	A	B
Populus	11.943	A	B
Corylus	13.235		B

Figure 54 : Test de Bonferroni / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
Pinus vs Corylus	-7.206	-3.581	3.219	0.001	Oui
Pinus vs Populus	-5.914	-2.939	3.219	0.007	Non
Pinus vs Carpinus	-4.358	-2.166	3.219	0.039	Non
Pinus vs Betula	-3.671	-1.824	3.219	0.079	Non
Pinus vs Quercus	-0.017	-0.008	3.219	0.993	Non
Quercus vs Corylus	-7.189	-3.572	3.219	0.001	Oui
Quercus vs Populus	-5.897	-2.930	3.219	0.007	Non
Quercus vs Carpinus	-4.342	-2.157	3.219	0.040	Non
Quercus vs Betula	-3.655	-1.816	3.219	0.081	Non
Betula vs Corylus	-3.535	-1.756	3.219	0.090	Non
Betula vs Populus	-2.243	-1.114	3.219	0.275	Non
Betula vs Carpinus	-0.687	-0.341	3.219	0.735	Non
Carpinus vs Corylus	-2.847	-1.415	3.219	0.169	Non
Carpinus vs Populus	-1.556	-0.773	3.219	0.446	Non
Populus vs Corylus	-1.292	-0.642	3.219	0.526	Non
Niveau de signification corrigé :			0.003		

Figure 55 : Différences significatives taxons

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
Pinus	6.029	A	
Quercus	6.046	A	
Betula	9.700	A	B
Carpinus	10.387	A	B
Populus	11.943	A	B
Corylus	13.235		B

Figure 56 : test de REGWQ / espèces ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)	Significatif
Pinus vs Corylus	-7.206	-3.581	3.064	0.015	0.050	Oui
Pinus vs Populus	-5.914	-2.939	2.921	0.048	0.050	Oui
Pinus vs Carpinus	-4.358	-2.166	2.921	0.159	0.050	Non
Pinus vs Betula	-3.671	-1.824				Non
Pinus vs Quercus	-0.017	-0.008				Non
Quercus vs Corylus	-7.189	-3.572	2.921	0.011	0.050	Oui
Quercus vs Populus	-5.897	-2.930	2.915	0.032	0.034	Oui
Quercus vs Carpinus	-4.342	-2.157	2.915	0.097	0.034	Non
Quercus vs Betula	-3.655	-1.816				Non
Betula vs Corylus	-3.535	-1.756	2.915	0.316	0.034	Non
Betula vs Populus	-2.243	-1.114	2.786	0.514	0.025	Non
Betula vs Carpinus	-0.687	-0.341				Non
Carpinus vs Corylus	-2.847	-1.415	2.786	0.348	0.025	Non
Carpinus vs Populus	-1.556	-0.773				Non
Populus vs Corylus	-1.292	-0.642				Non

Figure 57 : Différences significatives taxons

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
Pinus	6.029	A	
Quercus	6.046	A	
Betula	9.700	A	B
Carpinus	10.387	A	B
Populus	11.943		B
Corylus	13.235		B

Figure 58 : Test de Dunnett (bilatéral) / Espèce ; Analyse des différences entre la modalité témoin Espèce-Betula et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Modalité	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence critique	Pr > Diff	Significatif
Betula vs Pinus	3.671	1.824	2.674	5.381	0.265	Non
Betula vs Quercus	3.655	1.816	2.674	5.381	0.269	Non
Betula vs Corylus	-3.535	-1.756	2.674	5.381	0.297	Non
Betula vs Populus	-2.243	-1.114	2.674	5.381	0.698	Non
Betula vs Carpinus	-0.687	-0.341	2.674	5.381	0.997	Non

Modalité mode de dépôt :

Figure 59 : Test de Tukey (HSD) / type de dépôt ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
enterré vs surface	-5.904	-5.081	2.052	< 0.0001	Oui
Valeur critique du d de Tukey :			2.902		

Figure 60 : Différences significatives type de dépôt

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
enterré	6.605	A
surface	12.508	B

Figure 61 : Modalité / Bonferroni / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
enterré vs surface	-5.904	-5.081	2.052	< 0.0001	Oui
Niveau de signification corrigé :			0.05		

Figure 62 : Différences significatives type de dépôt

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
enterré	6.605	A
surface	12.508	B

Figure 63 : Modalité / REGWQ / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)	Significatif
enterré vs surface	-5.904	-5.081	2.052	< 0.0001	0.050	Oui

Figure 64 : Différences significatives type de dépôt

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
enterré	6.605	A
surface	12.508	B

Figure 65 : Modalité / Dunnett (bilatéral) / Analyse des différences entre la modalité témoin Modalité-enterré et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Modalité	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence critique	Pr > Diff	Significatif
enterré vs surface	-5.904	-5.081	2.052	2.384	0.000	Oui

Modalité année :

Figure 66 : Année / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
2008 vs 2009	-5.308	-3.730	2.480	0.003	Oui
2008 vs 2010	-2.159	-1.517	2.480	0.299	Non
2010 vs 2009	-3.149	-2.213	2.480	0.087	Non
Valeur critique du d de Tukey :			3.507		

Figure 67 : Différences significatives années

Modalité	Moyenne estimée	Groupes
2008	7.068	A
2010	9.227	A B
2009	12.375	B

Figure 68 : Année / Bonferroni / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
2008 vs 2009	-5.308	-3.730	2.552	0.001	Oui
2008 vs 2010	-2.159	-1.517	2.552	0.141	Non
2010 vs 2009	-3.149	-2.213	2.552	0.036	Non
Niveau de signification corrigé :			0.017		

Figure 69 : Différences significatives années

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
2008	7.068	A	
2010	9.227	A	B
2009	12.375		B

Figure 70 : Année / REGWQ / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)	Significatif
2008 vs 2009	-5.308	-3.730	2.480	0.003	0.050	Oui
2008 vs 2010	-2.159	-1.517	2.052	0.141	0.050	Non
2010 vs 2009	-3.149	-2.213	2.052	0.036	0.050	Oui

Figure 71 : Différences significatives années

Modalité	Moyenne estimée	Groupes	
2008	7.068	A	
2010	9.227	A	
2009	12.375		B

Figure 72 : Année / Dunnett (bilatéral) / Analyse des différences entre la modalité témoin Année-2008 et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Modalité	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence critique	Pr > Diff	Significatif
2008 vs 2009	-5.308	-3.730	2.333	3.321	0.002	Oui
2008 vs 2010	-2.159	-1.517	2.333	3.321	0.240	Non

III.2. Essai d'alternances gel-dégel



Planche 7 : De gauche à droite et de haut en bas : préparation du sédiment, aspect des boîtes et détail après une première phase de gel ; détail de la fragmentation des charbons après 400 cycles gel-dégel au moment du démontage ; en bas, toutes les boîtes après ouverture. On distingue nettement les fentes de cryodessiccations.

III.2.1. Homogénéité de la fragmentation des lots

Comparaison des variances et distributions des deux séries (nombre total de fragments supérieur à 1mm)

Figure 73 : Test de Levene

F (Valeur observée)	0.044
F (Valeur critique)	4.225
DDL1	1
DDL2	26
p-value (unilatérale)	0.835
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : Les variances sont identiques.

Ha : Au moins l'une des variances est différente d'une autre.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 83.49%.

Figure 74 : Test de Mann-Whitney

U	109.500
Espérance	98.000
Variance (U)	473.537
p-value (bilatérale)	0.613
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.

Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 61.32%.

Comparaison des distributions des séries par classe de taille (Test de Mann-Whitney)

Figure 75 : Test de Mann-Whitney]0.5-1mm]

U	117.000
Espérance	98.000
Variance (U)	473.537
p-value (bilatérale)	0.395
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.

Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 39.52%.

Figure 76 : Test de Mann-Whitney]1-2mm]

U	108.000
Espérance	98.000
Variance (U)	473.537
p-value (bilatérale)	0.662
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.

Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 66.24%.

Figure 77 : Test de Mann-Whitney]2-4mm]

U	119.500
Espérance	98.000
Variance (U)	471.204
p-value (bilatérale)	0.333
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.

Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 33.33%.

Figure 78 : Test de Mann-Whitney >4mm

U	118.000
Espérance	98.000
Variance (U)	470.296
p-value (bilatérale)	0.369
alpha	0.05

Interprétation du test :

H₀ : La différence de position des échantillons est égale à 0.

H_a : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H₀.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H₀ alors qu'elle est vraie est de 36.86%.

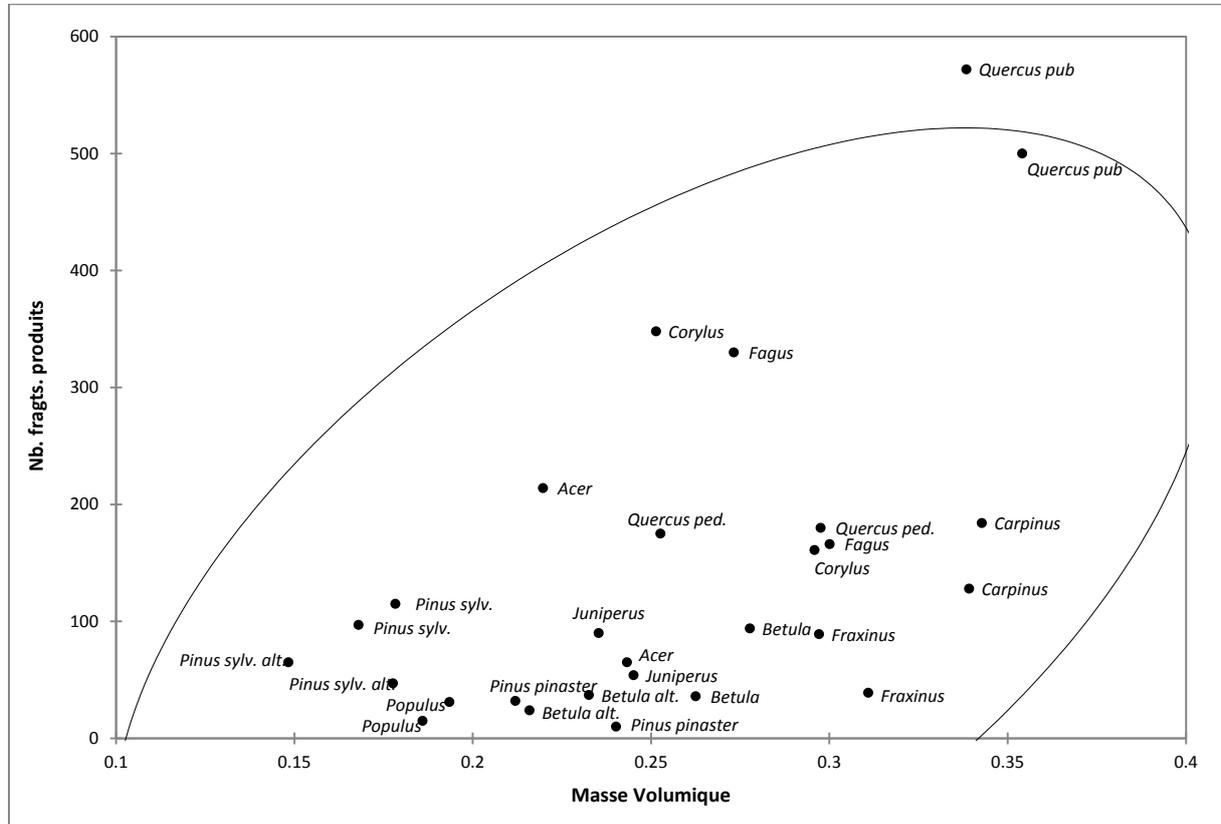
III.3. Aspect macroscopique du bois de *Pinus sylvestris* altéré

Figure 79 : *Pinus sylvestris* altéré avant combustion



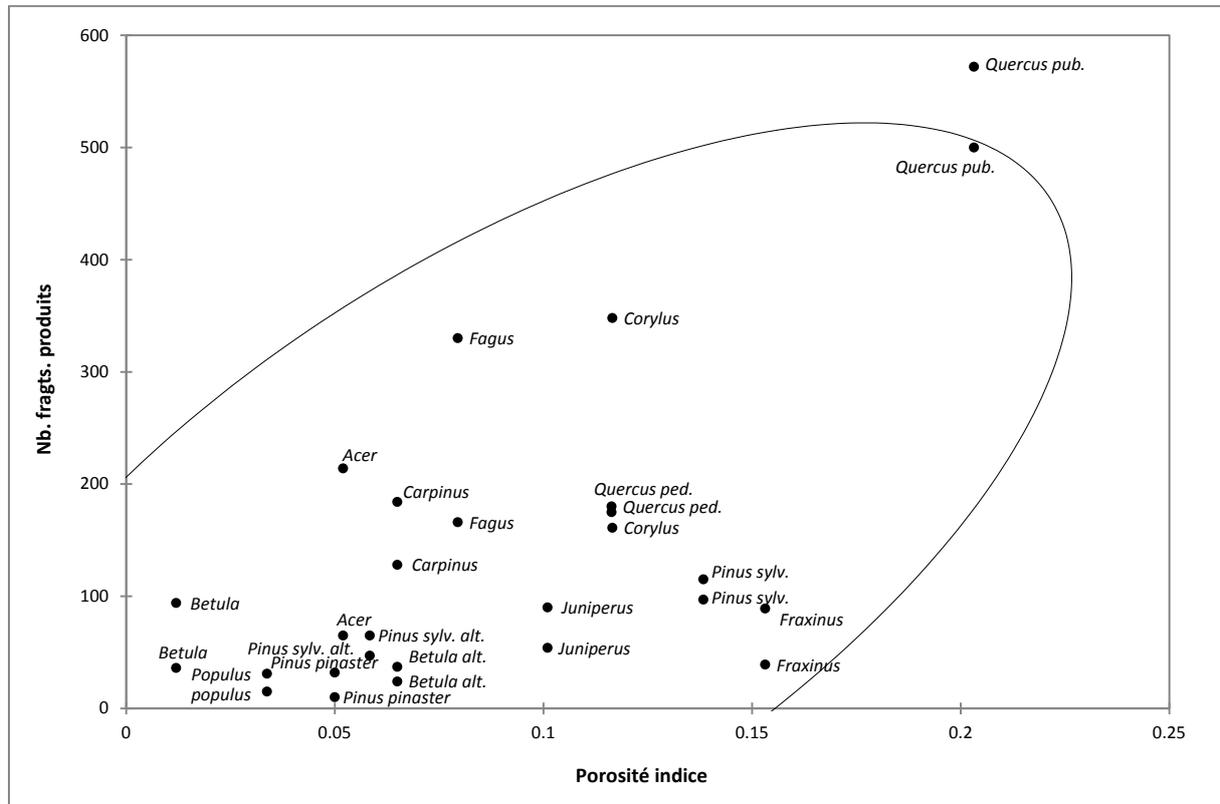
III.4. Lien entre fragmentation, masse volumique et porosité

Figure 80 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits à l'issue des tests gel-dégel et la masse volumique des fragments initiaux.



On constate que les espèces se fragmentant le plus (*Quercus pubescens*, *Corylus*, *Fagus*, *Quercus pedunculata*, *Carpinus*) sont les taxons dont la masse volumique est la plus élevée. Inversement, *Pinus sylvestris* altéré, *Pinus sylvestris*, *Populus*, *Betula* altéré, *Pinus pinaster*, présentent une masse volumique plus basse et se fragmentent peu. Les cas d'*Acer*, *Betula*, *Juniperus* et *Fraxinus* sont plus problématiques, *Fraxinus* en particulier présente une masse volumique élevée et une fragmentation réduite.

Figure 81 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits à l'issue des tests gel-dégel et l'indice de porosité (différence bois initial/bois final) des fragments initiaux.



La plupart des essences qui présentent un indice de porosité (différence bois initial/bois final) élevé ont une fragmentation importante (*Quercus pubescens*, *Corylus*, *Quercus pedunculata*). Inversement celles dont l'indice de porosité est bas se fragmentent peu (*Populus*, *Betula*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* altéré, *Betula* altéré). En revanche, la fragmentation d'*Acer*, *Carpinus*, *Juniperus*, *Fraxinus*, *Pinus sylvestris* et *Fagus* semble moins conditionnée par l'indice de porosité que les autres taxons.

Les relations entre masse volumique/fragmentation et porosité/fragmentation sont effectives sans pour autant être linéaires et ne suffisent pas à elles seules à expliquer la variabilité de la fragmentation des taxons. D'autres critères, liés par exemple à la composition chimique et cellulaire des taxons peuvent avoir une incidence. Par ailleurs, la mesure de l'indice de porosité mériterait d'être précisée en prenant en considération de plus nombreux échantillons. De même, la masse volumique est dépendante de la mesure du volume, qui, nous l'avons dit, reste imprécise, introduisant ainsi une part d'aléas qui affaiblit sans doute le poids de la liaison. Les mesures réalisées au chapitre III sur des cubes réguliers sont moins aléatoires et l'analyse mettrait en évidence un lien étroit entre fragmentation masse volumique et porosité ; ces corrélations doivent donc être prises en compte.

III. ANNEXES DU CHAPITRE V.

IV.1. Essai de météorisation

METEORISATION : MONTAGE ET DEPÔT



A gauche, préparation des contenants destinés à recevoir les charbons

A droite détail avant fermeture



A gauche, cellules expérimentales prêtes à être déposées

Ci-dessous, dépôt dans la station de Valbonne



A gauche, Station météo de Levens et vue depuis la Station

A droite, visite de contrôle en septembre 2010 (environ un an de dépôt). A Valbonne (gauche), les charbons sont intacts et mouillés. A Levens (droite), quelques taxons commencent à peine à se fragmenter. L'expérience est prolongée deux années de plus



Planche 8 : Mise en place de l'essai de météorisation

IV.1.1. Homogénéité de la fragmentation des lots

Station de Valbonne :

Figure 82 : Test de Levene

F (Valeur observée)	23.537
F (Valeur critique)	4.260
DDL1	1
DDL2	24
p-value (unilatérale)	< 0.0001
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : Les variances sont identiques.

Ha : Au moins l'une des variances est différente d'une autre.

Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification $\alpha=0.05$, on doit rejeter l'hypothèse nulle H0, et retenir l'hypothèse alternative Ha.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 0.01%.

Figure 83 : Test de Mann-Whitney

U	76.000
Espérance	84.500
Variance (U)	377.910
p-value (bilatérale)	0.681
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.

Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 68.07%.

Station de Levens :

Figure 84 : Test de Levene

F (Valeur observée)	0.179
F (Valeur critique)	4.260
DDL1	1
DDL2	24
p-value (unilatérale)	0.676
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : Les variances sont identiques.

Ha : Au moins l'une des variances est différente d'une autre.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 67.58%.

Figure 85 : Test de Mann-Whitney

U	81.500
Espérance	84.500
Variance (U)	379.340
p-value (bilatérale)	0.898
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.

Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 89.79%.

IV.1.2. Relation entre fragmentation, porosité et volume initial des fragments

Figure 86 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits à l'issue des essais de météorisation à Valbonne et l'indice de porosité globale (importance des vides) des fragments initiaux.

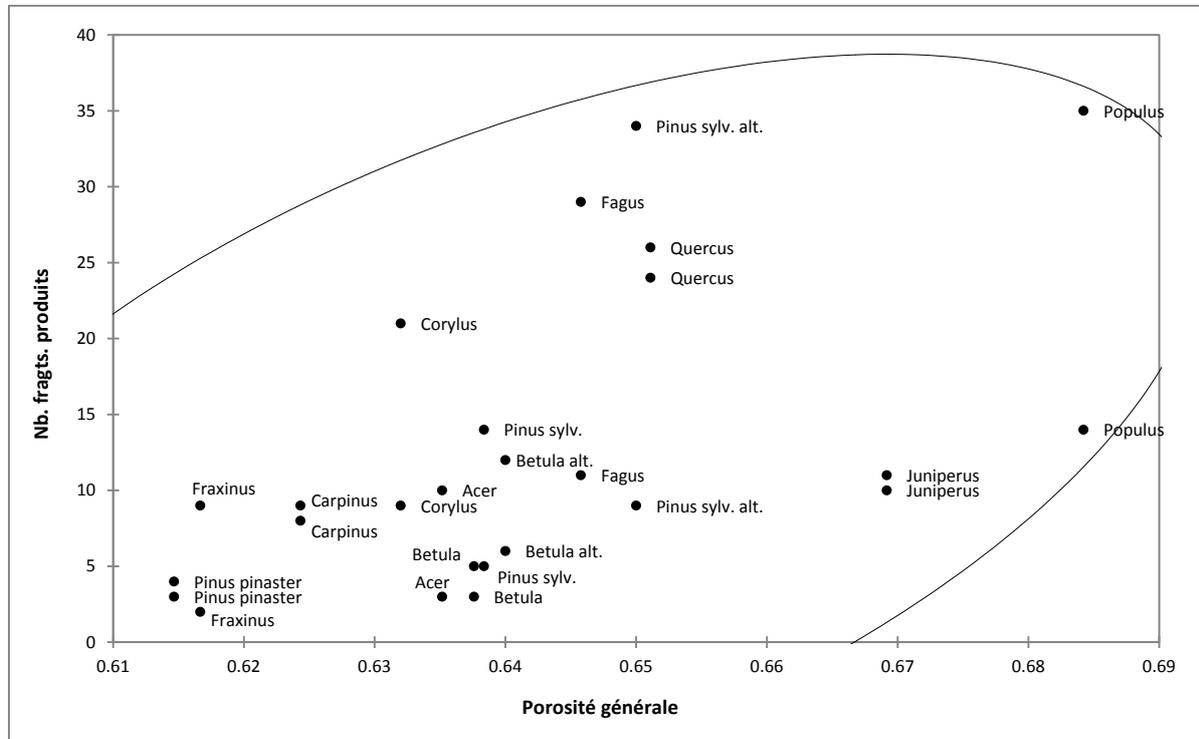
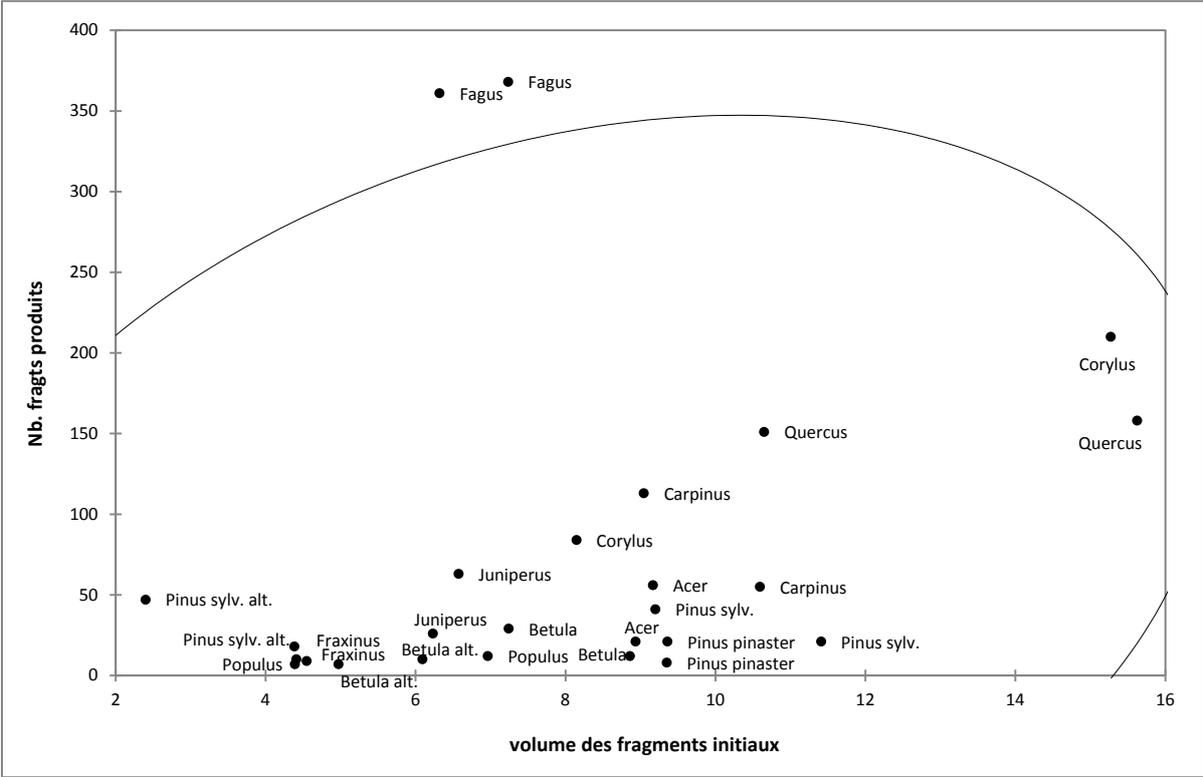


Figure 87 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits à l'issue des essais de météorisation à Levens et le volume des fragments initiaux.



IV.2. Essai d'alternances de retrait-gonflement du sédiment



En haut, de gauche à droite : remplissage des boîtes. Une dernière couche de sable puis d'argiles gonflantes et limons imbibés d'eau est versée sur les charbons.

A gauche, aspect du sédiment après 90 cycles d'imbibition-dessiccation. Echantillons avant démontage.

Ci-contre, fond d'une des boîtes après découpe à la scie circulaire pour extraire les deux cellules contenues sans refragmentation. On note que les fentes de retrait qui semblent peu nombreuses en surface atteignent le sédiment en profondeur.

Ci-dessous, litage observé dans la couche inférieure des boîtes et particules charbonneuses de très petite taille.

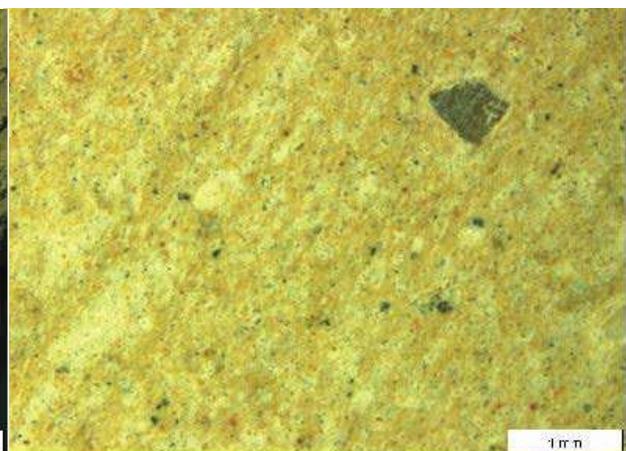


Planche 9 : Mise en place et démontage de l'essai de retrait-gonflement du sédiment

IV.2.1. Homogénéité de la fragmentation des lots

Figure 88 : Test de Levene :

F (Valeur observée)	0.322
F (Valeur critique)	4.225
DDL1	1
DDL2	26
p-value (unilatérale)	0.575
alpha	0.05

Interprétation du test :

H₀ : Les variances sont identiques.

H_a : Au moins l'une des variances est différente d'une autre.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H₀.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H₀ alors qu'elle est vraie est de 57.52%.

Figure 89 : Test de Mann-Whitney :

U	73.500
Espérance	98.000
Variance (U)	471.852
p-value (bilatérale)	0.269
alpha	0.05

Interprétation du test :

H₀ : La différence de position des échantillons est égale à 0.

H_a : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H₀.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H₀ alors qu'elle est vraie est de 26.92%.

IV.2.2. Différences significatives de fragmentation entre les taxons :

Figure 90 : Test de Kruskal-Wallis (sans correction de Bonferroni)

K	12.324
p-value (bilatérale)	0.509
alpha	0.05

Interprétation du test :

H₀ : Les échantillons proviennent de la même population.

H_a : Les échantillons proviennent de populations différentes.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H₀.

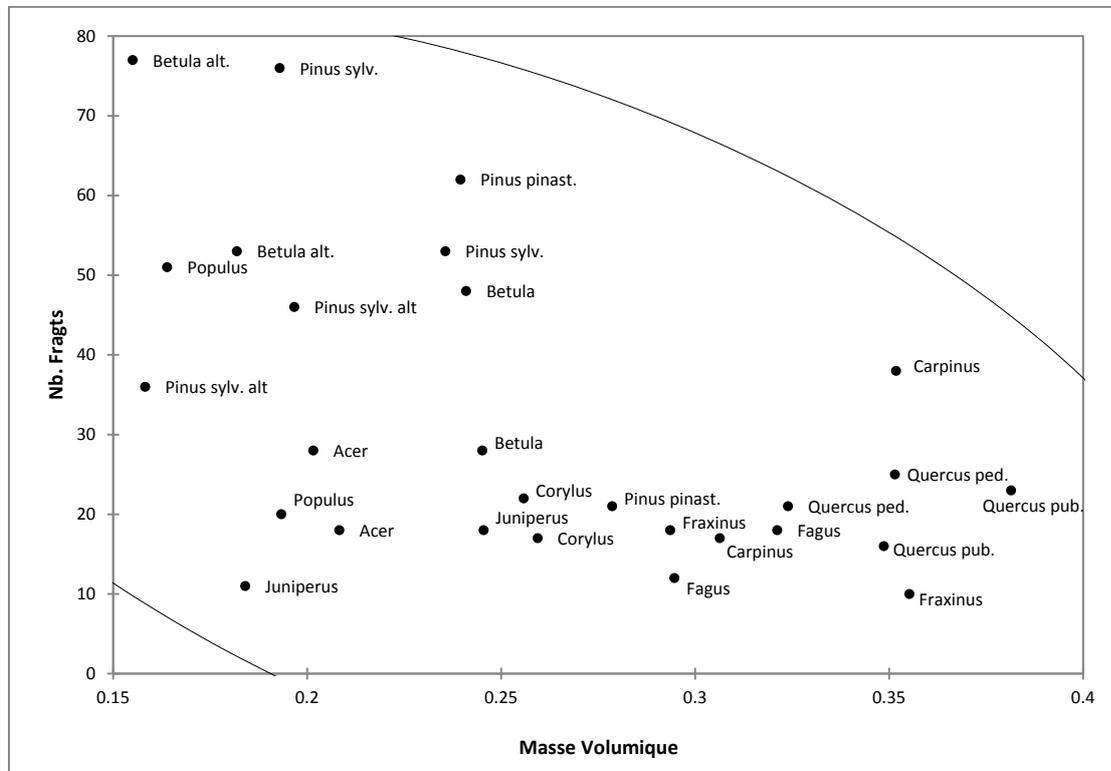
Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H₀ alors qu'elle est vraie est de 50.94%.

Figure 91 : Procédure de comparaisons multiples par paires (Procédure de Dunn, test bilatéral, sans correction de Bonferroni).

Échantillon	Effectif	Somme des rangs	Moyenne des rangs	Groupes	
<i>Fraxinus</i>	8	287.000	35.875	A	
<i>Fagus</i>	8	357.000	44.625	A	B
<i>Juniperus</i>	8	359.500	44.938	A	B
<i>Corylus</i>	8	398.000	49.750	A	B
<i>Quercus pub.</i>	8	402.000	50.250	A	B
<i>Acer</i>	8	416.500	52.063	A	B
<i>Quercus ped.</i>	8	426.500	53.313	A	B
<i>Carpinus</i>	8	454.000	56.750	A	B
<i>Pinus pinast.</i>	8	490.000	61.250	A	B
<i>Pinus sylv. Alt.</i>	8	513.500	64.188	A	B
<i>Populus</i>	8	520.000	65.000	A	B
<i>Betula</i>	8	538.000	67.250	A	B
<i>Pinus sylv.</i>	8	578.500	72.313		B
<i>Betula alt.</i>	8	587.500	73.438		B

IV.2.3. Relation entre fragmentation et masse volumique

Figure 92 : Nuage de point de la relation entre le nombre de fragments produits par les alternances retrait-gonflement et la masse volumique des charbons initiaux par taxon



IV.3. Essai d'imbibition-dessiccation des charbons de bois

IV.3.1. Homogénéité de la fragmentation des lots

Nombre de fragments par classes de taille mises bout à bout (n=52) :

Figure 93 : Test de Levene :

F (Valeur observée)	0.385
F (Valeur critique)	3.934
DDL1	1
DDL2	102
p-value (unilatérale)	0.536
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : Les variances sont identiques.

Ha : Au moins l'une des variances est différente d'une autre.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut

pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est de 53.64%.

Figure 94 : Test de Mann-Whitney :

U	1448.500
Espérance	1352.000
Variance (U)	22182.417
p-value (bilatérale)	0.519
alpha	0.05

Interprétation du test :

H_0 : La différence de position des échantillons n'est pas significativement différente de 0.

H_a : La différence de position des échantillons est significativement différente de 0.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on peut valider l'hypothèse nulle H_0 .

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est de 51.92%.

Nombre total de fragments, toutes classes confondues (n=13) :

Figure 95 : Test de Levene :

F (Valeur observée)	0.780
F (Valeur critique)	4.260
DDL1	1
DDL2	24
p-value (unilatérale)	0.386
alpha	0.05

Interprétation du test :

H_0 : Les variances sont identiques.

H_a : Au moins l'une des variances est différente d'une autre.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est de 38.60%.

Figure 96 : Test de Mann-Whitney :

U	101.000
Espérance	84.500
Variance (U)	366.340
p-value (bilatérale)	0.403
alpha	0.05

Interprétation du test :

H_0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.

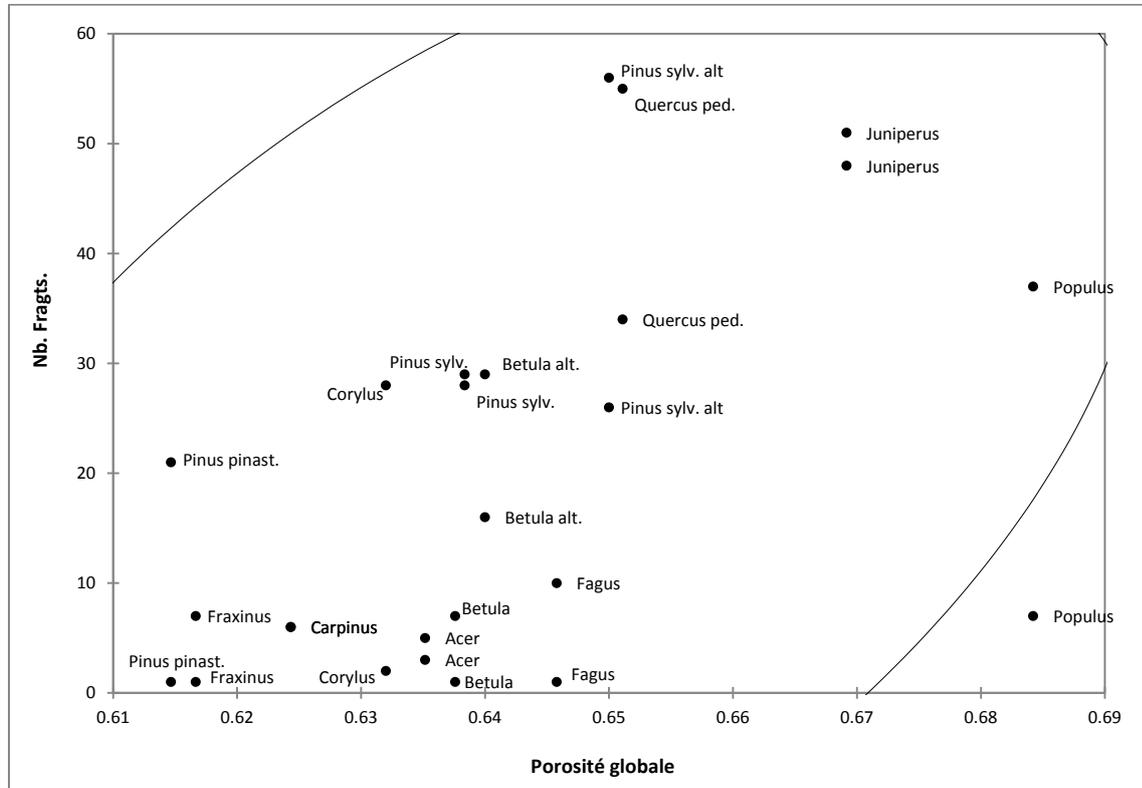
H_a : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H_0 .

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H_0 alors qu'elle est vraie est de 40.32%.

IV.3.2. Relation entre fragmentation et porosité globale

Figure 97 : Relation entre le nombre de fragments produits par les alternances imbibition-dessiccation et la porosité globale des taxons



IV.4. Essais de piétinement



Planche 10 : Mise en place et démontage des deux essais de piétinement

IV.4.1. Homogénéité de la fragmentation des lots de l'expérience 1

Nombre de fragments par classes de taille mises bout à bout (n=42)

Figure 99 : Test de Levene :

F (Valeur observée)	0.113
F (Valeur critique)	3.957
DDL1	1
DDL2	82
p-value (unilatérale)	0.738
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : Les variances ne sont pas significativement différentes.

Ha : Au moins l'une des variances est significativement différente d'une autre.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on peut valider l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 73.80%.

Figure 100 : Test de Mann-Whitney :

U	804.500
Espérance	882.000
Variance (U)	12490.193
p-value (bilatérale)	0.491
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : La différence de position des échantillons n'est pas significativement différente de 0.

Ha : La différence de position des échantillons est significativement différente de 0.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on peut valider l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 49.08%.

Nombre total de fragments toutes classes confondues (n=14)

Figure 101 : Test de Levene :

F (Valeur observée)	0.200
F (Valeur critique)	4.225
DDL1	1
DDL2	26
p-value (unilatérale)	0.658
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : Les variances ne sont pas significativement différentes.

Ha : Au moins l'une des variances est significativement différente d'une autre.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on peut valider l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 65.81%.

Figure 102 : Test de Mann-Whitney :

U	92.000
Espérance	98.000
Variance (U)	473.537
p-value (bilatérale)	0.794
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : La différence de position des échantillons n'est pas significativement différente de 0.

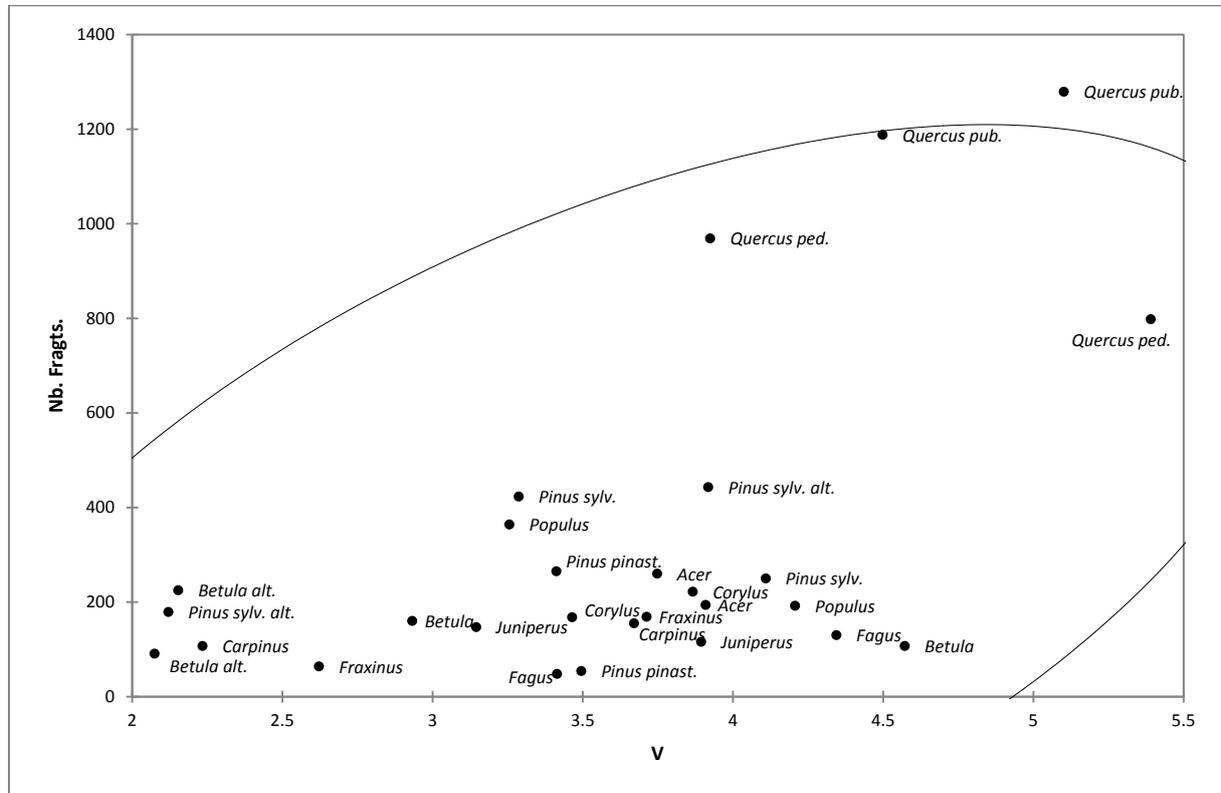
Ha : La différence de position des échantillons est significativement différente de 0.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0.05$, on peut valider l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 79.41%.

IV.4.2. Relation entre fragmentation et volume initial des fragments

Figure 103 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits par le piétinement et le volume initial des fragments des taxons inclus dans le sable



IV.4.3. Homogénéité de la fragmentation entre les deux cellules de l'expérience 2

Figure 104 : Test z pour deux échantillons indépendants :

Intervalle de confiance à 95% autour de la différence des moyennes :
] -8.991 ; 1.862 [

Différence	-3.565
z (Valeur observée)	-1.288
|z| (Valeur critique)	1.960
p-value (bilatérale)	0.198
alpha	0.05

Interprétation du test :

H0 : La différence entre les moyennes est égale à 0.

Ha : La différence entre les moyennes est différente de 0.

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H0.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H0 alors qu'elle est vraie est de 19.79%.

Figure 105 : Test t pour deux échantillons indépendants :

Intervalle de confiance à 95% autour de la différence des moyennes :
] -9.191 ; 2.062 [

Différence	-3.565
t (Valeur observée)	-1.288
|t| (Valeur critique)	2.032
DDL	34
p-value (bilatérale)	0.207
alpha	0.05

Interprétation du test :

H₀ : La différence entre les moyennes est égale à 0.

H_a : La différence entre les moyennes est différente de 0.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H₀.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H₀ alors qu'elle est vraie est de 20.66%.

Figure 106 : Test de Mann-Whitney :

U	123.000
Espérance	162.000
Variance (U)	996.429
p-value (bilatérale)	0.231
alpha	0.05

Interprétation du test :

H₀ : La différence de position des échantillons est égale à 0.

H_a : La différence de position des échantillons est différente de 0.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H₀.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H₀ alors qu'elle est vraie est de 23.06%.

Figure 107 : Test de Levene :

F (Valeur observée)	2.447
F (Valeur critique)	4.130
DDL1	1
DDL2	34
p-value (unilatérale)	0.127
alpha	0.05

Interprétation du test :

H₀ : Les variances sont identiques.

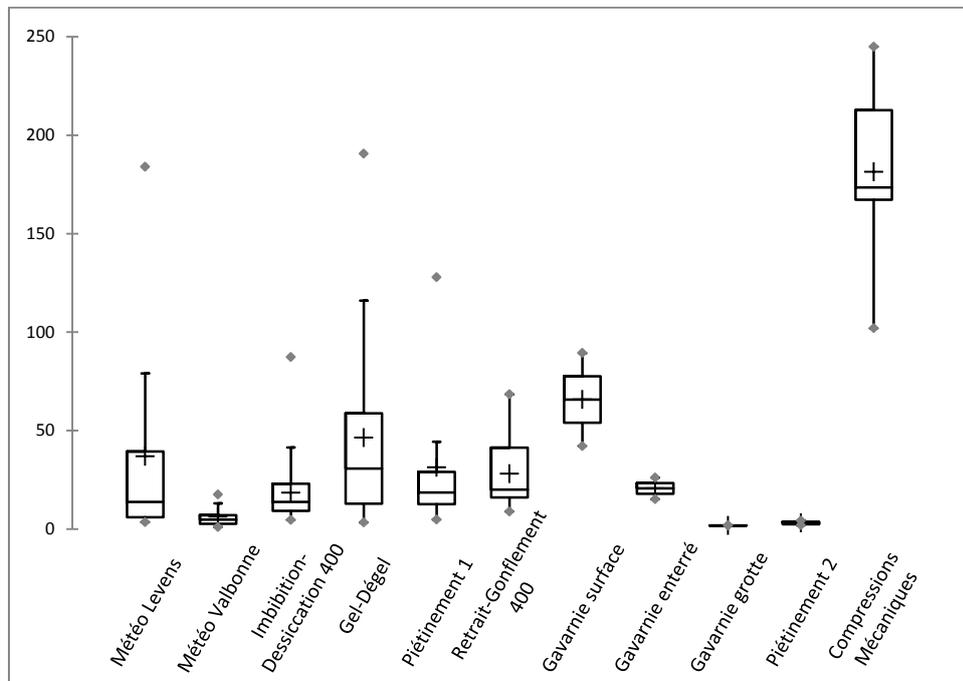
H_a : Au moins l'une des variances est différente d'une autre.

Étant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil alpha=0.05, on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle H₀.

Le risque de rejeter l'hypothèse nulle H₀ alors qu'elle est vraie est de 12.70%.

IV. ANNEXES DU CHAPITRE VI.

Figure 108 : Facteur d'augmentation du nombre total de fragments >1mm par expérimentation (tous taxons confondus) : les valeurs issues des alternances retrait-gonflement et imbibition-dessiccation sont multipliées pour atteindre 400 cycles et être théoriquement comparables avec les résultats des alternances gel-dégel.



V.1. Histogrammes de fragmentation

Les charbons de bois >4mm prélevés à Gavarnie ayant tous été pesés individuellement, il nous a été possible de réaliser des histogrammes de fragmentation semblables à ceux de Chabal par taxon et par type de dépôt (effectifs des fragments par classe de masse de 0.03g).

D'une manière générale, l'observation des trois figures qui suivent montre que la distribution de la fragmentation est proche de celle mise en évidence dans les échantillons de Lattes et du Marduel par Lucie Chabal : la répartition du nombre de fragments par classe de masse de 0.03g est effectivement caractérisée par un grand nombre de fragments de masse faible et un faible nombre de fragments de masse élevée. La distribution va globalement décroissant des classes de masse les plus faibles aux plus élevées sans pour

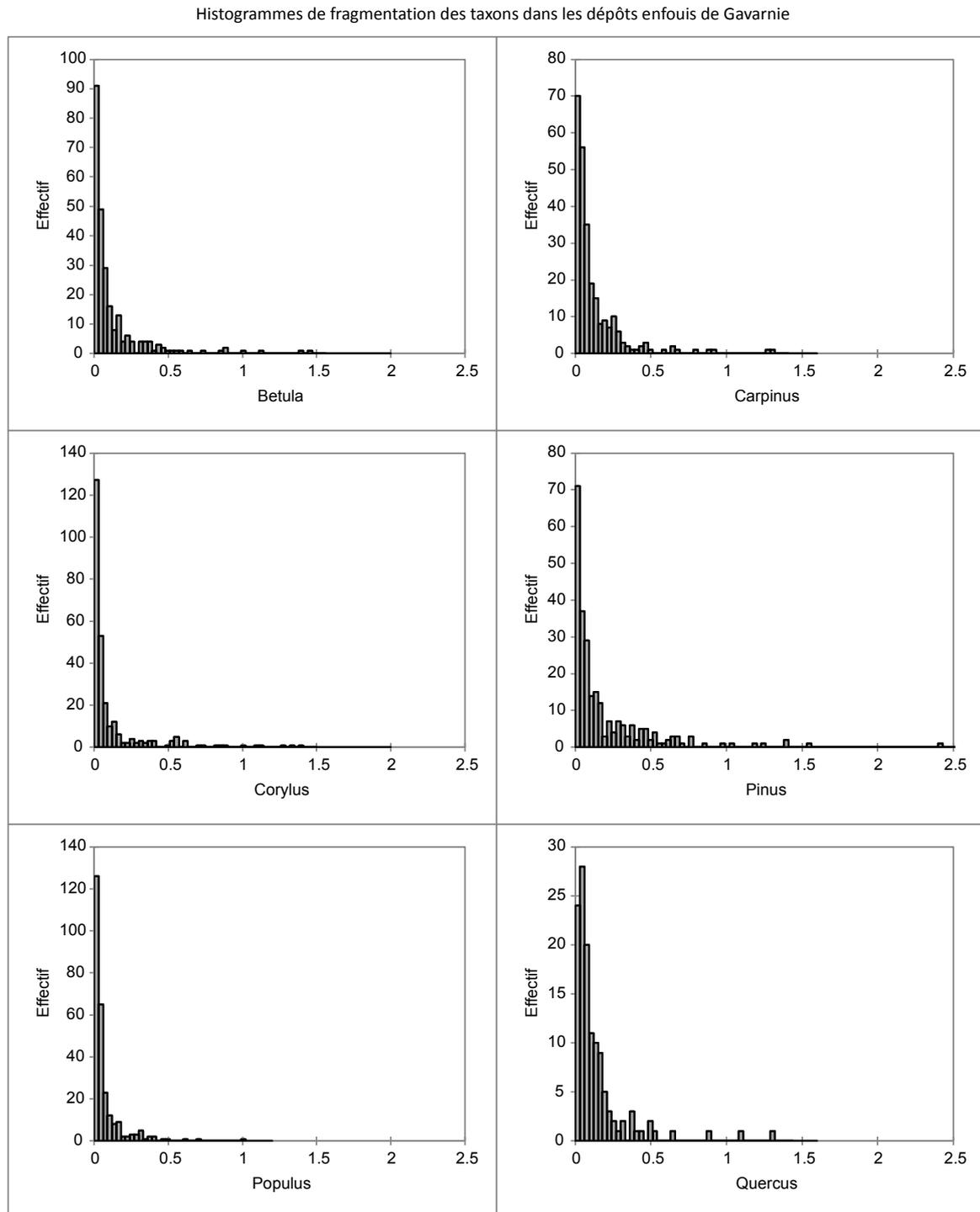
autant suivre une loi statistique de paramètre fixe. La variation vis-à-vis d'une distribution théorique régulière est liée à des aléas de sous-fragmentation (quelques fragments isolés dans les classes de masse élevée) et de sur-fragmentation (nombre disproportionné de fragments dans les classes de masse réduite).

Dans les dépôts enfouis (fig. 109), *Populus* est l'espèce la plus fragmentée, presque tous les fragments sont compris dans les classes de masses les plus faibles et ce taxon présente le moins grand nombre « d'aléas de sous-fragmentation », soit de fragments isolés dans les classes de masse les plus élevées. La fragmentation de *Corylus* est à peu près semblable, bien qu'il compte plus de fragments dans les classes élevées, de même que *Betula*. Comparée à une distribution statistiquement homogène, celles de *Populus* et *Corylus* présentent au contraire un « aléa de sur-fragmentation », la classe de masse inférieure étant nettement surreprésentée.

Carpinus présente une distribution légèrement différente avec moins de fragments dans la classe de masse la plus faible, ceux-ci étant répartis dans les classes immédiatement supérieures. Il compte également une meilleure représentation des classes élevées.

La distribution de *Pinus* est particulière, ce taxon présente à la fois une forte représentation des classes de masse faible et des classes de masse élevée, allant jusqu'à 2.5g. Enfin, *Quercus* se distingue assez nettement des autres taxons. La classe de masse la plus faible n'est pas la mieux représentée. Les fragments les plus nombreux sont contenus dans la classe 0.03-0.06 g, et les classes suivantes sont encore largement fournies. Il présente par ailleurs de plus nombreux aléas de sous-fragmentation, soit un nombre important de fragments dans les classes de masse élevée.

Figure 109 : Histogrammes de fragmentation par taxon pour les trois cellules enfouies de Gavarnie (nombre de fragments par classe de masse de 0.03g)



Dans les dépôts de surface (fig. 110), la fragmentation, plus « aboutie », est plus régulière. *Corylus* est l'espèce la plus fragmentée. Comparativement aux autres taxons, la plus grande part de ses fragments est contenue dans la classe inférieure, les petits fragments

sont ici à nouveau surreprésentés. Les autres classes sont très faiblement représentées. *Betula* compte un très grand nombre de fragments dans la première classe de masse, mais les classes suivantes sont un peu mieux fournies, de même que *Populus* et plus encore *Carpinus*. Les classes supérieures de tous ces taxons sont très faiblement représentées, bien que chacun compte quelques aléas de sous-fragmentation.

Enfin, les distributions de *Pinus* et *Quercus* sont ici aussi différentes, entre elles comme vis-à-vis du reste des taxons.

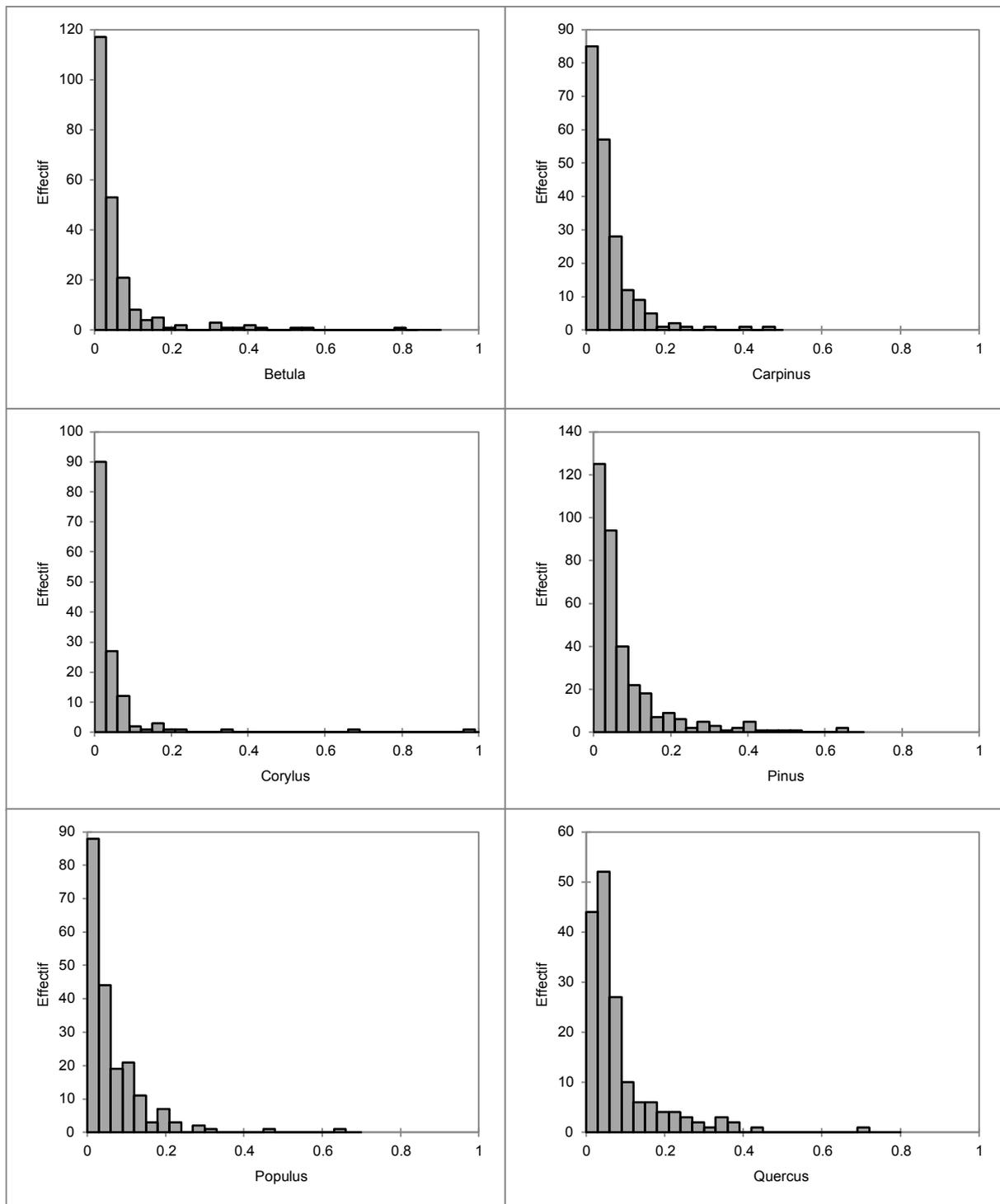
Pinus présente un très grand nombre de fragments dans la classe de masse inférieure, mais comparé aux taxons précédemment évoqués, la seconde classe est nettement plus fournie. Les classes suivantes sont encore assez bien représentées et la distribution s'échelonne de manière assez régulière quasiment jusqu'à 0.6g ; quelques fragments plus lourds sont isolés dans les classes de masse plus élevée.

Quercus, comme dans les dépôts enfouis, est le taxon le moins fragmenté. Sa distribution se distingue par la plus forte fréquence des fragments dans la seconde classe de masse par rapport à la première. Jusqu'à 0.4g, les classes de masse sont fortement représentées par rapport aux autres taxons.

Les différences de fragmentation entre les taxons mises en évidence au chapitre IV, sont donc bien perceptibles via la distribution du nombre de fragments par classes de masses.

Figure 110 : Histogrammes de fragmentation par taxon pour les trois cellules de surface de Gavarnie (nombre de fragments par classe de masse de 0.03g)

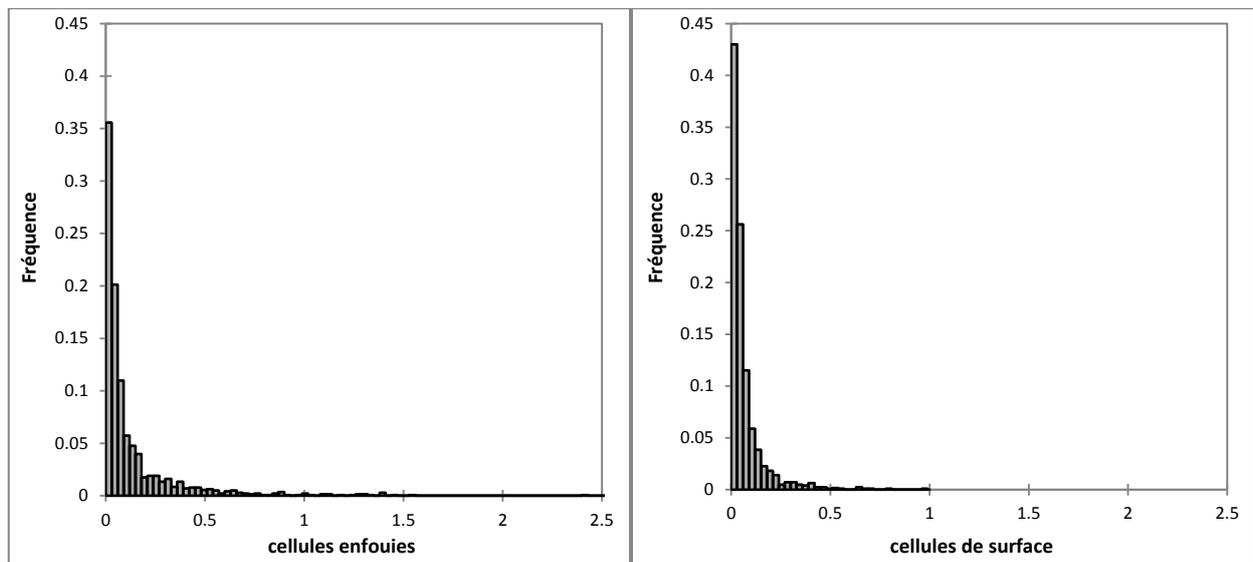
Histogrammes de fragmentation des taxons dans les dépôts de surface de Gavarnie



Les histogrammes synthétiques par type de dépôt (fig. 111) sont fondés sur les fréquences des fragments par classe de masse de 0.03g, tous taxons confondus. Ils mettent

bien en évidence les différences de fragmentation entre les cellules enterrées et les cellules de surface. Ces dernières, plus fragmentées, montrent un taux de fragments dans les classes de masse réduites plus élevées que dans les dépôts enfouis. Inversement, le nombre de classes représentées dans les masses élevées, comme le nombre de fragments dans ces classes est bien plus faible dans les cellules de surface que dans leurs homologues enfouies. La distribution de la fragmentation se distingue entre les deux types de dépôt.

Figure 111 : Histogrammes de fragmentation par type de dépôt, tous taxons confondus (fréquences des fragments par classes de masse de 0.03g).



Le contexte de dépôt influence bien le mode de fragmentation, et ce pour tous les taxons (les fragments des classes élevées sont de masse bien plus faible dans les dépôts de surface pour tous les taxons, fig. 109 et 110). Toutefois, les différences de fragmentation entre les taxons sont relativement constantes. La variabilité taxonomique de la fragmentation fait l'objet de larges développements dans la synthèse du mémoire (vol. 1).

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Mesures moyennes de la masse volumique des taxons	396
Figure 2 : Indice de porosité correspondant au rapport entre porosité du bois final et porosité du bois initial	396
Figure 3 : Indice de porosité globale moyenne des taxons	397
Figure 4 : Différences significatives de fragmentation des taxons. Table des p-values.....	399
Figure 5 : Test de Kruskal Walis relatif à la fragmentation des taxons dans la classe de taille]1-2mm]	399
Figure 6 : Test de Kruskal Walis relatif à la fragmentation des taxons dans la classe de taille]2-4mm]	399
Figure 7 : Test de Kruskal Walis relatif à la fragmentation des taxons dans la classe de taille >4mm.....	400
Figure 8 : Différences significatives de fragmentation des taxons par classe de taille de fragments. Comparaisons multiples par paires	401
Figure 9 : Table récapitulative des résultats des tests de Spearman mentionnés dans le texte	402
Figure 10 : Test de Tukey (HSD) / Espèce : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	409
Figure 11 : Différences significatives espèces	409
Figure 12 : Test de Bonferroni / Espèce : Analyse des différences entre les modalités	410
avec un intervalle de confiance à 95%	410
Figure 13 : Différences significatives espèces	410
Figure 14 : Test REGWQ / Espèce : Analyse des différences entre les modalités avec un	411
intervalle de confiance à 95%	411
Figure 15 : Différences significatives espèces	411
Figure 16 : Test de Dunnett (bilatéral) / Espèce : Analyse des différences entre la modalité	411
témoin Espèce-Betula et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95%	411
Figure 17 : Test de Tukey (HSD) / Type de dépôt : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	412
Figure 18 : Différences significatives type de dépôt	412
Figure 19 : Test de Bonferroni /Type de dépôt : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	412
Figure 20 : Différences significatives type de dépôt	412
Figure 21 : Test REGWQ /Type de dépôt : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	412
Figure 22 : Différences significatives type de dépôt	413
Figure 24 : Test de Tukey (HSD) / Année : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	413
Figure 25 : Différences significatives années	413
Figure 26 : Test de Bonferroni / Année : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	413
Figure 27 : Différences significatives années	414
Figure 28 : Test REGWQ / Année : Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	414
Figure 29 : Différences significatives années	414
Figure 30 : Test de Dunnett (bilatéral) / Année : Analyse des différences entre la modalité témoin Année-2008 et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95%	414

Figure 31 : Test de Tukey (HSD) / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	415
Figure 32 : Différences significatives taxons	415
Figure 33 : Test de Bonferroni / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	416
Figure 34 : Différences significatives taxons	416
Figure 35 : Test REGWQ / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	417
Figure 36 : Différences significatives taxons	417
Figure 37 : Test de Dunnett (bilatéral) / Espèce ; Analyse des différences entre la modalité témoin Espèce-Betula et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95%	417
Figure 38 : test de Tukey (HSD) / type de dépôt ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	418
Figure 39 : Différences significatives type de dépôt	418
Figure 40 : Test de Bonferroni / type de dépôt ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	418
Figure 41 : Différences significatives type de dépôt	418
Figure 42 : Test REGWQ / type de dépôt ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	418
Figure 43 : Différences significatives type de dépôt	419
Figure 44 : Test de Dunnett (bilatéral) / type de dépôt ; Analyse des différences entre la modalité témoin Modalité-enterré	419
Figure 45 : Test de Tukey (HSD) / Année ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	419
Figure 46 : Différences significatives années	419
Figure 47 : Test de Bonferroni / Années ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	419
Figure 48 : Différences significatives années	420
Figure 49 : Test REGWQ / Année ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	420
Figure 50 : Différences significatives années	420
Figure 51 : Test de Dunnett (bilatéral) / Année ; Analyse des différences entre la modalité témoin Année-2008 et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95%	420
Figure 52 : Test de Tukey (HSD) / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	421
Figure 53 : Différences significatives taxons	421
Figure 54 : Test de Bonferroni / Espèce ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	422
Figure 55 : Différences significatives taxons	422
Figure 56 : test de REGWQ / espèces ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	423
Figure 57 : Différences significatives taxons	423
Figure 58 : Test de Dunnett (bilatéral) / Espèce ; Analyse des différences entre la modalité témoin Espèce-Betula et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95%	423

Figure 59 : Test de Tukey (HSD) / type de dépôt ; Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	424
Figure 60 : Différences significatives type de dépôt	424
Figure 61 : Modalité / Bonferroni / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	424
Figure 62 : Différences significatives type de dépôt	424
Figure 63 : Modalité / REGWQ / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	424
Figure 64 : Différences significatives type de dépôt	425
Figure 65 : Modalité / Dunnett (bilatéral) / Analyse des différences entre la modalité témoin Modalité-enterré et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95%	425
Figure 66 : Année / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	425
Figure 67 : Différences significatives années	425
Figure 68 : Année / Bonferroni / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	425
Figure 69 : Différences significatives années	426
Figure 70 : Année / REGWQ / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%	426
Figure 71 : Différences significatives années	426
Figure 72 : Année / Dunnett (bilatéral) / Analyse des différences entre la modalité témoin Année-2008 et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95%	426
Figure 73 : Test de Levene	428
Figure 74 : Test de Mann-Whitney	428
Figure 75 : Test de Mann-Whitney]0.5-1mm]	429
Figure 76 : Test de Mann-Whitney]1-2mm]	429
Figure 77 : Test de Mann-Whitney]2-4mm]	429
Figure 78 : Test de Mann-Whitney >4mm	430
Figure 79 : <i>Pinus sylvestris</i> altéré avant combustion	430
Figure 80 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits à l'issue des tests gel-dégel et la masse volumique des fragments initiaux	431
Figure 81 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits à l'issue des tests gel-dégel et l'indice de porosité (différence bois initial/bois final) des fragments initiaux	432
Figure 82 : Test de Levene	434
Figure 83 : Test de Mann-Whitney	434
Figure 85 : Test de Mann-Whitney	435
Figure 86 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits à l'issue des essais de météorisation à Valbonne et l'indice de porosité globale (importance des vides) des fragments initiaux	436
Figure 87 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits à l'issue des essais de météorisation à Levens et le volume des fragments initiaux	437
Figure 88 : Test de Levene	439
Figure 89 : Test de Mann-Whitney	439
Figure 90 : Test de Kruskal-Wallis (sans correction de Bonferroni)	439

Figure 91 : Procédure de comparaisons multiples par paires (Procédure de Dunn, test bilatéral, sans correction de Bonferroni).....	440
Figure 92 : Nuage de point de la relation entre le nombre de fragments produits par les alternances retrait-gonflement et la masse volumique des charbons initiaux par taxon	441
Figure 93 : Test de Levene	441
Figure 94 : Test de Mann-Whitney	442
Figure 95 : Test de Levene	442
Figure 96 : Test de Mann-Whitney	442
Figure 97 : Relation entre le nombre de fragments produits par les alternances imbibition-dessiccation et la porosité globale des taxons	443
Figure 99 : Test de Levene	445
Figure 100 : Test de Mann-Whitney	445
Figure 101 : Test de Levene	445
Figure 103 : Nuage de points de la relation entre le nombre de fragments produits par le piétinement et le volume initial des fragments des taxons inclus dans le sable	447
Figure 104 : Test z pour deux échantillons indépendants	447
Figure 105 : Test t pour deux échantillons indépendants	448
Figure 106 : Test de Mann-Whitney	448
Figure 107 : Test de Levene	448
Figure 108 : Facteur d'augmentation du nombre total de fragments >1mm par expérimentation (tous taxons confondus) : les valeurs issues des alternances retrait-gonflement et imbibition-dessiccation sont multipliées pour atteindre 400 cycles et être théoriquement comparables avec les résultats des alternances gel-dégel .	449
Figure 109 : Histogrammes de fragmentation par taxon pour les trois cellules enfouies de Gavarnie (nombre de fragments par classe de masse de 0.03g)	451
Figure 110 : Histogrammes de fragmentation par taxon pour les trois cellules de surface de Gavarnie (nombre de fragments par classe de masse de 0.03g)	453
Figure 111 : Histogrammes de fragmentation par type de dépôt, tous taxons confondus (fréquences des fragments par classes de masse de 0.03g).....	454

TABLE DES PLANCHES

Planche 1' : Préparation des échantillons destinés à la caractérisation des propriétés mécaniques des charbons de bois et premiers tests de compression	398
Planche 1 : Dépôt des cellules expérimentales et détails d'une des cellules de la grotte du Névé et du dépôt témoin extérieur	400
Planche 2 : Gavarnie : 1) Vue générale du versant, 2) Grotte du Névé, 3) Vue de la zone expérimentale en sept. 2008, encore sous la neige, 4) station météo réinstallée en 2007, 5) gélifraction des bloc avec structuration, les particules fines sont au centre et les plus grossières à la périphérie, 6) Fond d'un petit lac temporaire au pied de la grotte dans lequel se développe un réseau polygonal de fentes de cryodessiccation, 7) réseau de polygone à proximité des cellules expérimentales, les parois sont recolonisées par la végétation, 8) détail du réseau de polygone du fond du lac	404
Planche 3 : Gavarnie : Vues année par années des cellules expérimentales 1 à 4	405
Planche 4 : Gavarnie : Vues année par année des cellules expérimentales 1' à 4' et cellule témoin	406
Planche 5 : Gavarnie : Détail de la cellule 3'	407
Planche 6 : Gavarnie : Détail de la cellule 4'	408
Planche 7 : Tests de gels-dégel : De gauche à droite et de haut en bas : préparation sédiment, aspect des boîtes et détail après une première phase de gel ; détail de la fragmentation après 400 cycles au moment du démontage ; en bas, toutes les boîtes après ouverture. On distingue nettement les fentes de cryodessiccations	427
Planche 8 : Mise en place de l'essai de météorisation	433
Planche 9 : Mise en place et démontage de l'essai de retrait-gonflement du sédiment	438
Planche 10 : Mise en place et démontage des deux essais de piétinement	444