



HAL
open science

Résilience des écosystèmes : approche multiproxy de l'impact environnemental des activités humaines passées et récentes dans les Vosges du Nord (mines, verreries, activités militaires et agro-pastorales).

Emilie Gouriveau

► **To cite this version:**

Emilie Gouriveau. Résilience des écosystèmes : approche multiproxy de l'impact environnemental des activités humaines passées et récentes dans les Vosges du Nord (mines, verreries, activités militaires et agro-pastorales).. Sciences agricoles. Université Bourgogne Franche-Comté, 2020. Français. NNT : 2020UBFCD039 . tel-03134915

HAL Id: tel-03134915

<https://theses.hal.science/tel-03134915v1>

Submitted on 8 Feb 2021

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.



**THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
PRÉPARÉE À L'UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ**

Ecole doctorale « Environnements – Santé » (n°554)

Doctorat de **BIOLOGIE DES POPULATIONS ET ÉCOLOGIE**

Par

Emilie GOURIVEAU

Résilience des écosystèmes : approche multiproxy de l'impact
environnemental des activités humaines passées et récentes dans les
Vosges du Nord (mines, verreries, activités militaires et agro-pastorales)

Soutenue à Besançon, le 2 octobre 2020

Composition du Jury :

M. SCHWARTZ Dominique , Professeur, Univ. Strasbourg, LIVE	Président du jury
M. ARNAUD Fabien , Directeur de recherche, CNRS, EDYTEM	Rapporteur
M. MIRAS Yannick , Ingénieur de recherche, CNRS, HNHP	Rapporteur
M. MULLER Serge , Professeur, MNHN, ISYEB	Examineur
M. MESSAGER Erwan , Chargé de recherche, CNRS, EDYTEM	Examineur
Mme WALTER-SIMONNET Anne-Véronique , MCF, UBFC, Laboratoire Chrono-Environnement	Directrice de thèse
Mme SCHNITZLER Annik , Professeur, Univ. Lorraine, LIEC	Codirectrice de thèse
Mme RUFFALDI Pascale , MCF, UBFC, Laboratoire Chrono-Environnement	Codirectrice de thèse
M. DUCHAMP Loïc , Conservateur de la réserve naturelle des Rochers et tourbières du Pays de Bitche	Invité

Remerciements

Dans un premier temps, je souhaiterais remercier mes encadrantes d'avoir proposé ce sujet passionnant. Il m'a permis de poursuivre ma formation en palynologie, de me former à la recherche et à la pluridisciplinarité, tout en découvrant une région méconnue, le *Bitcherland*, son histoire, son identité, ses coutumes, ses contes et ses légendes...

Merci à Anne-Véronique et à Pascale d'avoir été présentes tout au long de mes quatre années de thèse pour répondre à mes questions, suivre mes réflexions ou discuter de mes résultats. Merci à Pascale de m'avoir aidée à finir les comptages polliniques des bas de séquences. Merci, enfin, de m'avoir accompagnée à mes premiers colloques, ce fût de bons moments. Je me souviendrai encore longtemps de nos séjours dans les Vosges du Nord, surtout dans notre petit hôtel du Windstein où les clés nous attendaient sur le rebord de la fenêtre.

Merci également à Annik qui, malgré la distance, a toujours répondu très rapidement à mes questions et m'a apporté de nombreux éléments de réflexion, que ce soit sur l'écologie ou sur l'histoire du Pays de Bitche et de ses forêts.

Merci aux organismes qui ont participé au financement de cette thèse : l'Observatoire Hommes-Milieux « Pays de Bitche » et le LabEX DRIHM, l'Agence de l'Eau, et le Commissariat au Massif des Vosges. Cette thèse n'aurait également pas pu être menée sans la collaboration de nombreux acteurs locaux et régionaux : M. le Maire de Bitche, M. le Maire de Sturzelbronn, Marie L'Hospitalier de Natura 2000, la forêt de Pimodan et son gestionnaire Evrard De Turckheim, l'Agence ONF de Sarrebourg ...

Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury : Yannick Miras et Fabien Arnaud, d'avoir accepté le rôle de rapporteurs, Serge Muller, Dominique Schwartz et Erwan Messenger d'avoir accepté d'examiner ce manuscrit.

Je remercie vivement Loïc Duchamp, membre invité du jury, conservateur de la Réserve naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche, qui a constitué une pierre angulaire de cette thèse, tant par sa présence indispensable sur le terrain, que pour son suivi lors des réunions à Sturzelbronn ou encore pour son dynamisme dans l'interprétation des résultats.

Merci pour les longues discussions au téléphone qui m'ont vraiment aidée à comprendre l'écologie de cette région particulière et ont fait avancer mes interprétations.

Merci également à Vincent Robin pour la collaboration sur ce sujet et notamment sur l'analyse des particules carbonisées, son implication, et sa disponibilité tout au long de ma thèse.

Une pensée à David, collègue de thèse. Je me souviens encore de notre première présentation à la Journée d'Ecologie Historique de Lorraine en 2016.

Merci aux membres du Comité de suivi de thèse, Hélène Celle-Jeanton, Vincent Lebreton, et Gaël Leroux qui ont été au rendez-vous chaque début d'année pour faire le point sur mon avancement, me proposer des pistes de réflexion et me donner des conseils :

Je tiens également à remercier le Centre Wollbrett de la Société d'Histoire et d'Archéologie de Saverne et environs, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur aide dans la recherche bibliographique. De même, je remercie sincèrement M. Sébastien Schmit et M. Jean-François Kraft pour nos échanges sur l'histoire du Pays de Bitche et notamment sur les activités minières dans la région. Je remercie également toutes les personnes que j'ai pu contacter et qui m'ont apporté des réponses et des informations, parmi eux : Emmanuelle Bonnaire, Julian Wiethold, et bien d'autres...

Merci au Laboratoire Chrono-Environnement qui a été le cadre de ces années de thèse et à toutes les personnes du labo que j'ai côtoyé. Parmi eux je tiens à remercier Julien Didier et Antoine Hache de m'avoir dévoilé les secrets d'une préparation pollinique bien faite et d'avoir préparé certains des échantillons. Merci à Isabelle d'avoir pris le temps de venir voir les pollens les moins évidents à identifier, souvent les plus moches... désolée... Merci également à Estelle Camizuli de m'avoir appris les ficelles de QGIS, ce qui m'a permis de réaliser la grande majorité de mes cartes.

Je tiens à remercier Martine Gautheron, secrétaire de l'Ecole Doctorale ES, qui a toujours répondu à mes questions, ainsi que l'Ecole Doctorale pour l'attribution des deux bourses de mobilité qui m'ont permis de me rendre à Vienne et à Bordeaux pour des colloques internationaux.

J'ai eu la chance de participer à l'encadrement de cinq stagiaires de licence et de master, Cécile, Amandine, Fiona, Emilie et Anaïs, et je les remercie pour le travail qu'elles ont réalisé.

Je dois également remercier ici Aurélie Salavert et Vincent Lebreton sans qui je ne serais pas là aujourd'hui. Merci à eux de m'avoir accueillie au Muséum National d'Histoire Naturelle pour mes deux années de Master, de m'avoir initiée à la pluridisciplinarité et à la recherche, ce qui m'a donné l'envie de continuer. Merci à Aurélie pour sa formation en anthracologie, discipline que j'espère un jour pouvoir pratiquer à nouveau et merci également de m'avoir plongée dans le monde de l'archéologie. Merci à Vincent de m'avoir apporté de solides bases en palynologie et de m'avoir accompagnée dans l'après-master.

Pour tous les bons moments passés au labo et en dehors, je tiens vraiment à remercier les occupants du bureau -116L : Cyril, Bertil, Thomas et José. Nous avons formé une chouette équipe pendant les deux premières années et j'espère que nos routes se recroiseront un jour, dans un autre contexte... Merci aux occupants du bureau -213M qui m'ont accueillie pour ma troisième année, Caroline, Nicolas et Kevin. Un grand merci à Caroline qui a été mon contact bisontin pour préparer mon installation et pour mon arrivée au laboratoire. Merci d'avoir pris le temps d'analyser les macrorestes de mes échantillons et de m'avoir conviée à l'organisation des Rencontres archéobotaniques à Besse-et-Saint-Anastaise, ce fût une très bonne expérience et un très bon moment de partage et de convivialité. Une pensée enfin à tous les Primos de 2016 !

Un énorme merci aux membres du service Sciences, Arts, Culture de l'Université de Franche-Comté ! Merci à Elodie, Jérémy et Jeanne-Antide pour leur formation « Expérimentarium » et pour toutes les expériences de vulgarisation scientifique qu'ils m'ont proposées par la suite. Tous ces événements m'ont offert la possibilité de parler de mon sujet d'une autre manière et de découvrir un autre point de vue. Cela a été une grande joie pour moi de voir l'intérêt que porte le public aux sujets de recherche et leur émerveillement face aux pollens et ce, de 7 à 77 ans ! Merci également de m'avoir offert l'occasion à deux reprises de participer à la mise en BD de mon sujet de recherche. À bientôt, je l'espère, pour d'autres moments de diffusion et de partage.

Enfin, vient le moment de remercier ceux sans qui rien de tout cela n'aurait été possible : les Gougous. Papa, Maman, mes (parent-thèses), merci pour tout ce que vous m'avez appris, toutes ces choses qui m'ont menée là où j'en suis. Vinvin, merci pour ces inoubliables week-ends bisontins qui venaient rompre ma solitude, nous avons la passion commune des arbres : toi en planches et en meubles et moi en pollens et en charbons ! Mama, *ma sœur, nous avons des cœurs siamois, et personne ne croit en toi comme j'y crois!* Je t'ouvre la voie, bonne continuation avec Louis Auzoux et bon ATER ! Merci à vous tous de vous être impliqués dans ma thèse en partant une semaine dans les Vosges du Nord, au bord de l'étang de Hanau, avec Julien Goret ! Merci les filles pour vos conseils, vos corrections (même si certaines dataient un peu :)) et pour votre soutien.

Merci aussi à la famille Zappellini de m'avoir fait découvrir l'Alsace et d'avoir participé à ma thèse en m'offrant des boules de Noël de Meisenthal ! Merci à Sophie et Loïc pour ce superbe week-end à la Petite-Pierre.

Ma thèse m'aura conduite dans un jardin alpin à 2058 m d'altitude où j'ai rencontré un garçon formidable, qui m'a soutenu et motivé tout au long de mon travail. Cyril, je te remercie du fond du cœur pour tout ce que tu as fait pour moi.

Cette thèse, je te la dédie Momone ! Je suis sûre que tu aurais aimé la lire... La voici...

Sommaire

Remerciements	3
Sommaire	7
Liste des figures	13
Liste des tableaux.....	19
Liste des annexes	21
Valorisation scientifique.....	23
Plongée littéraire dans les Vosges du Nord.....	25
Introduction	27
1. Contexte de la recherche	29
2. Synthèse des études polliniques dans la région d'étude.....	34
2.1. Le Massif des Vosges et les régions voisines	34
2.1.1. Les grands traits de l'histoire de la végétation	35
2.1.2. Données sur l'anthropisation de la région.....	39
2.2. Les Vosges du Nord	44
3. Objectifs de l'étude	45
Chapitre I. Présentation du cadre d'étude	47
I.1. Les Vosges du Nord.....	49
I.1.1. Géographie	50
I.1.2. Géologie.....	51
I.1.3. Hydrologie	55
I.1.4. Climat.....	56
I.1.5. Végétation actuelle.....	56
I.1.6. Tourbières et étangs dans le Pays de Bitche	60
I.2. Contexte historique.....	64
I.2.1. Histoire des occupations humaines dans les Vosges du Nord	64
I.2.1.1. Le Paléolithique : 801950-11550 cal. BP / 800000-9600 cal. BC	65
I.2.1.2. Le Mésolithique : 11550-7450 cal. BP / 9600-5500 cal. BC.....	66
I.2.1.3. Le Néolithique : 7450-4150 cal. BP / 5500-2200 cal. BC	67
I.2.1.4. La Protohistoire	70
I.2.1.4.1. L'Âge du Bronze : 4150-2750 cal. BP / 2200-800 cal. BC.....	71
I.2.1.4.2. L'Âge du Fer 2750-2000 cal. BP / 800-50 cal. BC.....	71

I.2.1.5. La période romaine : 2000-1450 cal. BP / 50 cal. BC-500 cal. AD	75
I.2.1.6. Du Moyen Âge à nos jours : 1450 cal. BP / 500 cal. AD	78
I.2.2. Histoire industrielle des Vosges du Nord	83
I.2.2.1. Les activités de verrerie	83
I.2.2.2. Les activités métallurgiques.....	88
I.2.3. Histoire des forêts des Vosges du Nord	94
I.2.3.1. Avant le Moyen Âge	95
I.2.3.2. Le tournant du Moyen Âge.....	95
I.2.3.3. L'époque moderne.....	98
Chapitre II. Une approche multi-proxy.....	103
II.1. Les prélèvements.....	105
II.2. Les analyses polliniques	106
II.2.1. Echantillonnage et préparations chimiques	106
II.2.2. Analyses polliniques.....	106
II.2.3. Les indices d'anthropisation	107
II.2.4. Représentations des résultats	110
II.3. Les spores de champignons et les algues	111
II.3.1. Généralités sur les « microfossiles non-polliniques ».....	111
II.3.2. Les spores de champignons coprophiles (SCC)	112
II.3.3. Les autres spores de champignons.....	114
II.3.4. Les algues.....	115
II.3.5. Préparation, comptages et représentations	116
II.4. Les particules carbonisées.....	116
II.4.1. Reconstituer l'histoire des feux	116
II.4.2. Micro-particules carbonisées : Préparation, identification, comptages et représentations ..	117
II.4.3. Macro-particules carbonisées : Préparation, identification, comptages et représentations ..	119
II.5. Les analyses carpologiques	120
II.6. Les analyses du sédiment : sédimentologie, géophysique et géochimique	120
II.6.1. Perte au feu	120
II.6.2. Mesure de la susceptibilité magnétique.....	121
II.6.3. Analyse géochimique	121
II.6.3.1. La fluorescence des rayons X (XRF).....	121
II.6.3.2. Reconstituer l'histoire des pollutions métalliques.....	122
II.7. Les datations.....	123

II.7.1. Datations radiocarbone AMS	123
II.7.2. Datations au Pb210	124
II.8. Les analyses de raréfaction	124
Chapitre III. Les sites étudiés	127
III.1. La tourbière de la Horn (HOR)	130
III.1.1. Localisation et végétation actuelle	130
III.1.2. Contexte historique du site de la Horn	131
III.1.3. Description de la séquence et chronologie	133
III.1.4. Résultats	135
III.1.4.1. Description des résultats	135
III.1.4.2. Commentaires	144
III.2. L'étang-tourbière de Kobert-Haut (KOH)	148
III.2.1. Localisation et végétation actuelle	148
III.2.2. Contexte historique du site de Kobert-Haut	150
III.2.3. Description de la séquence et chronologie	152
III.2.4. Résultats	154
III.2.4.1. Description des résultats	154
III.2.4.2. Commentaires	161
III.3. L'étang-tourbière de Waldeck (WAL)	165
III.3.1. Localisation et végétation actuelle	165
III.3.2. Contexte historique du site de Waldeck	167
III.3.3. Description de la séquence et chronologie	170
III.3.4. Résultats	172
III.3.4.1. Description des diagrammes polliniques	172
III.3.4.2. Commentaires	183
III.4. La bétulaie tourbeuse du Bitscherthal	186
III.4.1. Localisation et végétation actuelle	186
III.4.2. Contexte historique du site de Bitscherthal	188
III.4.3. Description de la séquence et chronologie	190
III.4.4. Résultats	192
Chapitre IV. Histoire de la végétation	193
IV.1. Mise en place de la végétation régionale	195
IV.2. Le cas du pin dans les Vosges du Nord	203

IV.3. Le cas de l'épicéa	208
IV.4. Mise en place de la végétation locale	211
Chapitre V. Impacts des activités humaines sur les écosystèmes	221
V.1. Identification et impact des activités humaines.....	223
V.1.1. Les pratiques culturelles.....	223
V.1.1.1. Les premiers indices polliniques de la culture des céréales.....	223
V.1.1.2. Intensification des cultures et premiers impacts : de l'Âge des Métaux à l'époque romaine.....	226
V.1.1.3. Diversification des cultures et impact grandissant à partir du Moyen Âge.....	228
V.1.1.4. Évolution des systèmes agraires	230
V.1.1.4.1. Un système agro-forestier sur abattis-brûlis.....	231
V.1.1.4.2. Un système de céréaliculture avec jachères herbacées	232
V.1.1.4.3. Le retour des jachères forestières	234
V.1.2. Le pastoralisme.....	236
V.1.2.1. Les indices de présence du bétail.....	237
V.1.2.2. Pratiques pastorales et formations végétales induites par l'élevage	240
V.1.2.2.1. Formations herbacées liées au pâturage	241
V.1.2.2.2. Le cas particulier du pâturage en forêt.....	242
V.1.2.2.3. La grasse pâture.....	244
V.1.2.2.4. Les prairies de fauche	246
V.1.3. Les activités pré-industrielles xylophages.....	247
V.1.3.1. Les phases d'activités métallurgiques dans les Vosges du Nord.....	248
V.1.3.2. L'exploitation des forêts par les activités métallurgiques	253
V.1.3.3. La sélection des essences	257
V.2. Utilisation des zones humides et mise en place de leur végétation actuelle.....	259
V.2.1. Pratiques agro-pastorales sur les zones humides	259
V.2.2. Construction des étangs au Moyen Âge	267
V.2.3. Mise en place de la végétation actuelle des zones humides	269
Chapitre VI. Reconstitution de l'impact environnemental des sociétés humaines du Pays de Bitche du Mésolithique à nos jours.....	271
VI.1. Évolution de l'utilisation du paysage du Pays de Bitche du Néolithique à nos jours.....	273
VI.2. Apport à la connaissance de l'histoire du Pays de Bitche et intégration dans le contexte régional	278
VI.2.1. Du Mésolithique à l'Âge des Métaux	279

VI.2.2. L'époque romaine	284
VI.2.3. Du Moyen Âge à nos jours : le Pays de Bitche face à l'histoire	287
VI.2.3.1. Modifications de l'utilisation des paysages du Pays de Bitche au Moyen Âge et à l'époque moderne dans le contexte régional.....	287
VI.2.3.2. La détérioration climatique en Alsace-Lorraine (800-1050 cal. AD)	291
VI.2.3.3. La fondation de l'abbaye de Sturzelbronn (1135 cal. AD).....	292
VI.2.3.4. La construction du château de Waldeck	292
VI.2.3.5. Le XIVème siècle.....	294
VI.2.3.6. La Guerre de Trente ans (1618-1648)	294
VI.2.3.7. La croissance démographique et économique des XVIIIème et XIXème siècles.....	295
VI.2.4. Mise en évidence d'un gradient est-ouest d'anthropisation	296
VI.3. Reconstitution de l'évolution de la biodiversité passée	299
Conclusion générale	305
1. Eléments de conclusion	307
2. Perspectives.....	311
Annexes.....	315
Bibliographie.....	331

Liste des figures

Figure 1-1 : Localisation des Vosges du Nord et du Pays de Bitche	33
Figure 2-1 : Localisation des études citées dans le texte.....	35
Figure 2-2 : Diagrammes polliniques simplifiés représentant l'évolution des principaux taxons arboréens sur le Plateau Lorrain, dans le Massif des Vosges et en Forêt Noire (modifié d'après : DE KLERK, 2014, RÖSCH, 2000, RUFFALDI <i>et al.</i> , 2015)	37
Figure I.1-1 : Division du Pays de Bitche en Imgau (pays découvert) et Wasgau (pays couvert) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ORTHO ©IGN).....	49
Figure I.1-2 : Le relief du massif des Vosges (A), les trois types de reliefs des Vosges du Nord (B, C, D) (DALBAVIE, 1999) et localisation des « cuvettes » du Pays de Bitche (E) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN)	51
Figure I.1-3 : Rocher gréseux du château de Waldeck (Moselle) (cliché : E.Gouriveau)	52
Figure I.1-4 : Carte géologique simplifiée des Vosges (d'après BEGEOT et al. 2019) (A) et résumé de la série du Buntsandstein (B).....	53
Figure I.1-5 : Carte géologique du Pays de Bitche, 1 : Tourbière de Kobert-Haut, 2 : Tourbière de la Horn, 3 : Tourbière de Waldeck, 4 : Tourbière de Bitscherthal (auteur : E.Gouriveau, source : Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004).....	54
Figure I.1-6 : Carte d'occupation du sol du PNR des Vosges du Nord en 2018 (Auteurs: NC.GH, SYCOPARC, 2020, source: SYCOPARC, CLC 2018).....	57
Figure I.1-7 : Toposéquence de la végétation des Basses Vosges gréseuses (simplifiée d'après BŒUF et al., 2014).....	58
Figure I.1-8 : Carte des sites de la Réserve Naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche (auteurs : SYCOPARC, PZ-GH-LD, source : SYCOPARC)	63
Figure I.2-1 : Localisation des découvertes du Paléolithique dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT et al., 2017) et le département du Bas-Rhin (d'après la Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN,)	65
Figure I.2-2 : Pointe de la Font-Robert, Rimling (SCHMIT 2015, cliché : S. Schmit)	66
Figure I.2-3 : Localisation des découvertes du Mésolithique dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT et al., 2017) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN,).....	67
Figure I.2-4 : Polissoir d'Haspelschiedt (source : maisonsdesrochers-graufthal.fr)	68
Figure I.2-5 : Localisation des découvertes du Néolithique dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT et al., 2017) et le département du Bas-Rhin (d'après la Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN,)	69
Figure I.2-6 : Haches polies et pointes de flèches découvertes au Pays de Bitche (SCHMIT et al., 2017, cliché : S. Schmit).....	70
Figure I.2-7 : Localisation des découvertes de la Protohistoire dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT et al. 2017) et le département du Bas-Rhin (d'après la Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN,)	70
Figure I.2-8 : Poignard en bronze, Bitche – " Rue Saint-Sébastien" (cliché : S. Schmit).....	71
Figure I.2-9 : Carte de la Cité des Médiomatiques (simplifiée et modifiée d'après FELIU, 2008).....	72
Figure I.2-10 : Deux faces d'un potin « au sanglier », Rimling (SCHMIT, 2015, cliché : S. Schmit)	73

Figure I.2-11 : La « Pierre des 12 apôtres », Meisenthal (Moselle) (source : wikipedia.org).....	75
Figure I.2-12 : Localisation des découvertes gallo-romaines dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT et al. 2017) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN,).....	76
Figure I.2-13 : Rocher des Trois Figures, Lemberg.....	77
Figure I.2-14 : Carte des voies romaines et des abbayes et monastères médiévaux du Massif des Vosges (modifiée d'après BEGEOT et al., 2019).....	78
Figure I.2-15 : Localisation des découvertes du Haut Moyen Âge dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT et al. 2017) et de l'époque mérovingienne dans le département du Bas-Rhin (d'après la Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN,).....	79
Figure I.2-16 : Division du Royaume de Charlemagne après le Traité de Verdun (crédit : gallimard jeunesse).....	80
Figure I.2-17 : Localisation des châteaux dans les Vosges du Nord (extrait d'après SCHWIEN, 2016)	81
Figure I.2-18 : Plan de Bitche en 1707 (source : SKORKA, 2006, Archive départementales de la Moselle)	82
Figure I.2-19 : Carte des sites industriels (minerais, mines, forges et verreries) des Vosges du Nord (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN, Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004)	84
Figure I.2-20 : Tête d'homme dite "Christ de Wissembourg"	85
Figure I.2-21 : Lithographie de la cristallerie de Saint-Louis du début du XIXème siècle (source : MARTIN, 2015).....	87
Figure I.2-22 : Hache plate en cuivre de Rimling "Kohlhecke" photographie (T.Lucas-©MNHA).....	88
Figure I.2-23 : Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000, feuille Lille-Bruxelles (source : MELOUX et al., 1987)	89
Figure I.2-24 : Galerie d'extraction du minerai de fer dans le Pays de Bitche	90
Figure I.2-25 : Les charbonniers, Heinrich Gross, La Croix -aux-Mines, 1909	92
Figure I.2-26 : Localisation, construction et acquisition des usines De Dietrich (source : Musée historique et industriel de Reichshoffen)	94
Figure I.2-27 : La glandée (Les Très Riches Heures du duc de Berry, mois de Novembre, Jean Colombe, XVème siècle) (source : wikipedia.org).....	97
Figure I.2-28 : Exploitation d'un canton forestier par la verrerie de Goetzenbruck (à 9 km au sud de Bitche), 1756 (source : JEHIN, 2006, Archives Nationales, NIII, Moselle 6, 2029)	98
Figure II.1-1 : Photo d'un carottage au carottier russe et photo d'un sondage dans le carottier (cliché : E.Gouriveau).....	105
Figure II.3-1 : Photographies au microscope optique des spores de champignons coprophiles. a : <i>Sordaria</i> -type, b : <i>Cercophora</i> -type, c : <i>Sporormiella</i> -type, d : <i>Podospora</i> -type.....	113
Figure II.4-1 : Photographies au microscope optique de microparticules carbonisées comptées dans nos échantillons polliniques.....	118
Figure III.1 : Localisation des sites étudiés dans le Pays de Bitche (source : BD ALTIV2 ©IGN)	129
Figure III.1-1 : Localisation de la tourbière de La Horn et de son bassin versant (A) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN) et photo du site de prélèvement (B) (cliché: E. Gouriveau).....	130

Figure III.1-2: Absence de l'étang d'Hasselfurth sur la carte de Cassini (A) (source : Géoportail, ©CNRS, BNF) et sa représentation sur les cartes d'Etat Major (B) (source: Géoportail, ©CNRS, BNF, IGN)	131
Figure III.1-3 : Entrée de la citadelle de Vauban à Bitche (cliché : E.Gouriveau)	132
Figure III.1-4 : Photographie et description de la séquence de HOR.....	133
Figure III.1-5: Modèle âge-profondeur de la séquence de HOR (A), courbe de l'activité du ¹³⁷ Cs (B) et évolution du taux d'accumulation (C).....	134
Figure III.1-6: Diagramme pollinique simplifié de la végétation régionale de la séquence de HOR. LPAZ : local pollen assemblage zone, AP : arboreal pollen, IPA : indices polliniques d'anthropisation. (analyses : E.Gouriveau, P.Ruffaldi).....	136
Figure III.1-7: Diagramme pollinique simplifié de la végétation locale de la séquence de HOR. LPAZ: local pollen assemblage zone, AP: arboreal pollen. (analyses : E.Gouriveau, P.Ruffaldi)	138
Figure III.1-8: Résultats des comptages des spores de champignons et restes d'algues, des micro-particules carbonisées (μPC) et analyse (CharAnalysis) des macro-particules carbonisées (MPC), ainsi que le nombre des carporestes identifiés dans la séquence de HOR. (analyses : E.Gouriveau, analyses MPC : V.Robin, analyses carpologiques : C.Schaal)	140
Figure III.1-9 : Résultats de la perte au feu, des mesures de susceptibilité magnétique et résultats simplifiés de l'analyse XRF de la séquence de HOR.....	142
Figure III.1-10: Courbes de quelques taxons polliniques présentés en concentration (nb/gramme de sédiment) et courbe de la fraction minérale pour la séquence de HOR.	145
Figure III.2-1 : Localisation de la tourbière de Kobert-Haut et de son bassin versant (A) (auteur : E.Gouriveau, source : BDALTI2 ©IGN) et photo du site de prélèvement (B) (cliché: E.Gouriveau)	148
Figure III.2-2 : Carte de végétation du site de l'étang-tourbière de Kobert-Haut	149
Figure III.2-3 : Présence (?) sur les cartes de Cassini (A) (source : Géoportail, ©CNRS, BNF) et de l'Etat Major (B) (source : Géoportail, ©CNRS, BNF, IGN).....	150
Figure III.2-4 : Portail datant de la reconstruction de l'abbaye de Sturzelbronn au XVIIIème siècle (crédit : camping-muhlenbach.com).....	151
Figure III.2-5 : Photographie et description de la séquence de KOH.....	152
Figure III.2-6 : Modèle âge-profondeur de la séquence de KOH (A) et évolution du taux d'accumulation (B)	153
Figure III.2-7: Diagramme pollinique simplifié de la végétation régionale enregistrée au site de KOH. LPAZ: local pollen assemblage zone, AP: arboreal pollen, IPA: indices polliniques d'anthropisation (analyses : E.Gouriveau, P.Ruffaldi).....	155
Figure III.2-8: Diagramme pollinique de la végétation locale autour du site de KOH. LPAZ: local pollen assemblage zone, AP: arboreal pollen. (analyses : E.Gouriveau, P.Ruffaldi)	157
Figure III.2-9 : Résultats simplifiés de la perte au feu, de la susceptibilité magnétique (SM), ainsi que des comptages des micro-particules carbonisées (μPC), l'analyse des macro-particules carbonisées (MPC) et les concentrations des spores de microfossiles non-polliniques pour la séquence de KOH (analyses :E.Gouriveau, analyses MPC : V.Robin).....	159
Figure III.2-10: Quelques taxons polliniques présentés en concentration (nb/g de sédiment).....	162
Figure III.3-1 : Localisation de l'étang-tourbière de Waldeck et son bassin versant (A) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTI2 ©IGN) et photographie du site de prélèvement (B) (cliché : E. Gouriveau)	165

Figure III.3-2: Carte de la végétation de l'étang-tourbière de Waldeck.....	166
Figure III.3-3: Absence de l'étang de Waldeck sur la carte de Cassini (A) (source : Géoportail, ©CNRS, BNF) et sa représentation sur l'Atlas topographique du Comté de Bitche (B).(source : Géoportail, ©CNRS, BNF, IGN).....	167
Figure III.3-4: Localisation des ruines du château de Waldeck, surplombant l'étang-tourbière du même nom (cliché : E. Gouriveau).....	167
Figure III.3-5: Pilier de grès de la salle troglodyte du château de Waldeck (A), son donjon (B) et les pierres de taille à bossage (C) (clichés : E. Gouriveau)	168
Figure III.3-6: Hameau de Waldeck (source : JACOPS et al., 1990)	169
Figure III.3-7 : Photographie et description de la séquence de WAL.....	170
Figure III.3-8: Modèle âge-profondeur de la séquence de WAL (A), et évolution du taux d'accumulation (B)	171
Figure III.3-9: Diagramme pollinique simplifié de la végétation régionale enregistrée au site de WAL. LPAZ: local pollen assemblage zone, AP: arboreal pollen, IPA: indices polliniques d'anthropisation (analyses : E.Gouriveau)	173
Figure III.3-10 : Diagramme pollinique simplifié de la végétation locale de la séquence de WAL. LPAZ: local pollen assemblage zone, AP: arboreal pollen, NAP : non arboreal pollen (analyses : E.Gouriveau)	176
Figure III.3-11: Résultats simplifiés de la perte au feu, de l'analyse XRF et des comptages des spores de champignons coprophiles et des particules carbonisées pour la séquence de WAL (analyses : E.Gouriveau, analyses MPC : V.Robin, analyses carpologiques : C.Schaal)	178
Figure III.3-12 : Résultats de la perte au feu, des mesures de susceptibilité magnétique et résultats simplifiés de l'analyse XRF de la séquence de WAL.....	179
Figure III.3-13: Quelques taxons polliniques représentés en concentration (nb/g de sédiment).....	183
Figure III.4-1 : Photo du site de prélèvement dans la bétulaie tourbeuse de Bitscherthal (cliché : E.Gouriveau).....	186
Figure III.4-2 : Localisation de la bétulaie tourbeuse de Bitscherthal et des principaux sites historiques et industriels des environs (A, a et b : localisation des profils altimétriques)(auteur : E.Gouriveau, source : BDALTV2 ©IGN, KRAFT, 2013) et profils altimétriques nord-sud (B.a) et ouest-est (B.b). La flèche localise l'emplacement du point de prélèvement. (source : Géoportail ©IGN)	187
Figure III.4-3 : Carte de végétation du site de la bétulaie tourbeuse de Bitscherthal	188
Figure III.4-4 : Chapelle de Mouterhouse (cliché : E.Gouriveau)	189
Figure III.4-5 : Forge de Mouterhouse, dessin et lithographie de C. Hancké, 1869	190
Figure III.4-6 : Photographie et description de la séquence de Bitscherthal	191
Figure IV.1-1 : Comparaison des essences dominantes dans les trois séquences étudiées. (Les parenthèses concernent les essences secondaires bien représentées).....	195
Figure IV.1-2 : Evolution des principales essences autour de nos sites et les principaux évènements climatiques.	197
Figure IV.1-3 : Variation des pourcentages de Pinus, Quercus et Fagus pour les sites de KOH (en gris) et HOR (en blanc) et pour chaque période (Meso.: Mésolithique ; Neo.: Néolithique ; AB : Age du Bronze ; AF : Age du Fer ; ER : Epoque romaine ; MA: Moyen Âge ; PM : Période moderne).....	199
Figure IV.1-4 : Courbe pollinique de <i>Carpinus</i> et de <i>Castanea</i> et bloc diagramme synthétique des trois séquences étudiées.....	202

Figure IV.2-1 : Courbes polliniques de <i>Pinus</i> enregistrées dans plusieurs sites des régions voisines. A : tourbières des Vosges du Nord de cette étude, B : site de Francaltroff (Moselle) (RUFFALDI et al., 2015), C : courbe du pin du diagramme théorique des Vosges (DE KLERK, 2014), D : site du Rond Pertuis Supérieur (Hautes Vosges gréseuses) (SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015), E : site de Steerenmoos (Forêt Noire) (RÖSCH, 2000)	205
Figure IV.3-1 : Courbes polliniques de <i>Picea</i> dans différents sites des régions voisines des sites étudiés. A : courbe de <i>Picea</i> dans les trois sites d'étude et bloc diagramme synthétique des séquences, B : courbe pollinique du diagramme théorique des Vosges (DE KLERK, 2014), C : site du Rond Pertuis supérieur (Hautes Vosges gréseuses) (SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015), D : site de la Grande Basse (Vosges Centrales) (KALIS, 1984, KALIS et al. 2006), E : Site de Steerenmoos (Forêt Noire) (RÖSCH 2000)	209
Figure IV.4-1 : Comparaison des taxons dominants dans les trois séquences étudiées.	212
Figure IV.4-2 : Les différentes phases d'évolution de la végétation locale jusqu'à 2500 cal. BP dans les trois sites d'études. (IPA : indice pollinique d'anthropisation, MPC : taux d'accumulation des macro-particules carbonisées)	214
Figure IV.4-3 : Détail des indices « marqueurs » de la zone de 4000-3000 cal. BP dans la séquence de HOR (les comptages de <i>Juncus</i> sp. et <i>Carex</i> sp. trigone sont exprimés en nombre de restes, les concentrations des MNP sont en nb/gramme de sédiment).....	217
Figure V.1-1 : Diagramme simplifié des résultats en lien avec les activités agricoles dans les séquences de HOR, KOH et WAL. (AP/T : ratio arboreal pollens/total, μ PC : micro-particules carbonisées, IPA : indices polliniques d'anthropisation, a-b : Culture sur abattis-brûlis, jh : Jachère herbacée, PM : Période moderne, MA : Moyen Âge, ER : Epoque romaine, AF : Âge du Fer, AB : Âge du Bronze, Neo : Néolithique, Meso : Mésolithique, nb/gr : nombre de microfossiles ou des μ PC par gramme de sédiment)	224
Figure V.1-2 : Diagramme simplifié des résultats en lien avec les activités pastorales dans les séquences de HOR, KOH et WAL (AP/T : ratio arboreal pollens/total, IPA : indices polliniques d'anthropisation, μ PC : micro-particules carbonisées, PM : Période moderne, MA : Moyen Âge, ER : époque romaine, AF : Âge du Fer, AB : Âge du Bronze, Neo : Néolithique, Meso : Mésolithique, nb/gr : nombre de microfossiles et de μ PC par gramme de sédiment)	239
Figure V.1-3 : Diagrammes simplifiés présentant les principaux taxons arboréens, les micro-particules carbonisées et les courbes des rapports « élément métallique/titane » (AP : arboreal pollens ; IPA : indicateurs polliniques d'anthropisation ; μ PC: micro-particules carbonisées ; PM : période moderne, MA : Moyen Âge ; ER : époque romaine ; AF : Âge du Fer ; AB : Âge du Bronze ; Neo : Néolithique ; Meso : Mésolithique ; 1, 2, 3, 4, 5 : phases d'activités métallurgiques)	250
Figure V.1-4 : Pollution par le plomb dans les tourbières de HOR (A) et WAL (B), et dans différentes régions : massif du Morvan (C, Port des Lamberts, MONNA et al. 2004), Forêt Noire (D, Kohlhütte Moor, LE ROUX et al. 2005), massif des Vosges (E, Rossely, FOREL et al. 2010).....	252
Figure V.1-5 : Localisation d'une forge sur le Falkensteinerbach à proximité du site de Waldeck, sur la carte de Cassini (XVIIIème siècle) (source : ©IGN2019, ©Géoportail)	253
Figure V.1-6 : Inventaire préliminaire des charbonnières autour des sites d'étude sur la base de prospections de terrain (A) et de pointages sur données LIDAR (B et C – LIDAR ©LIEC2018) (source : V.Robin, données non publiées).....	254
Figure V.1-7 : Stratégie d'approvisionnement en bois et en minerai des sites de l'entreprise De Dietrich au XVIIIe siècle dans les Vosges du Nord (d'après JEHIN 2008).....	255
Figure V.1-8 : Carte de la répartition actuelle du chêne et du hêtre et localisation des anciennes forges et verreries du XVIIIème siècle (A), et carte de la répartition du hêtre et du chêne selon les registres de martelage du XVIIIème siècle (source : ROCHEL, 2017)	258

Figure V.2-1 : Diagramme simplifié de la végétation locale et les différentes phases d'activités humaines sur la zone humide de KOH. Les MNP sont présentés en nombre de spores par gramme de sédiment.....	262
Figure V.2-2 : Diagramme simplifié de la végétation locale et les différentes phases d'activités humaines sur la zone humide de WAL. Les MNP sont présentés en nombre de spores par gramme de sédiment.....	264
Figure V.2-3 : Diagramme simplifié de la végétation locale et les différentes phases d'activités humaines sur la zone humide de HOR. Les MNP sont présentés en nombre de spores par gramme de sédiment.....	266
Figure VI.1-1 : Figure de synthèse de l'histoire des activités humaines dans le Pays de Bitche du Mésolithique à nos jours (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN, Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004, SCHMIT et al., 2017)	276
Figure VI.2-1 : Intégration des premiers indices d'agriculture du Pays de Bitche dans le phénomène d'agriculture précoce (modifié d'après JEUNESSE, 2003)	280
Figure VI.2-2 : Impact de l'histoire des sociétés autour de la tourbière de HOR à partir de 3000 cal. BP (1050 cal. BC). (IPA : indices polliniques d'anthropisation, SCC : spores de champignons coprophiles, μ PC : micro-particules carbonisées)	283
Figure VI.2-3 : Impact de l'histoire des sociétés autour de la tourbière de KOH à partir de 3000 cal. BP (1050 cal. BC). (IPA : indices polliniques d'anthropisation, SCC : spores de champignons coprophiles, μ PC : micro-particules carbonisées)	284
Figure VI.2-4 : Impact de l'histoire des sociétés autour de la tourbière de WAL à partir de 1500 cal. BP (450 cal. AD). (IPA : indices polliniques d'anthropisation, SCC : spores de champignons coprophiles, μ PC : micro-particules carbonisées)	287
Figure VI.2-5: reconstitution paysagère d'après le cadastre « napoléonien » du XIXème siècle autour des communes d'Hottviller (à gauche) et d'Eguelshardt (à droite) (source : données non publiées, X.Rochel (LOTERR - Université de Lorraine)).....	298
Figure VI.3-1 : Comparaison des courbes de richesse pollinique attendue (E(Tn)), des principales phases d'activités agro-pastorales et des principales changements climatiques et des dans les trois sites du Pays de Bitche (PM : période moderne, MA : Moyen Âge, ER : époque romaine, AF : Âge du Fer, AB : Âge du Bronze, Neo : Néolithique, Meso : Mésolithique, a-b : système agraire sur abattis-brûlis, jh : système agraire à jachères herbacées, Gu. 30 : Guerre de Trente Ans, 14 ^e s. : Guerre de Cent Ans et épidémie de peste noire, dét. Al-Lo : détérioration climatique en Alsace-Lorraine, Ch. ER : chute de l'Empire Romain, péj. Hallstatt : péjoration climatique de l'Hallstatt, 4.2 ka BP : évènement climatique de 4200 cal. BP)	304

Liste des tableaux

Tableau III.1-1 : Datations radiocarbone effectuées pour la séquence de La Horn. Les dates en grisé ont été écartées du modèle âge-profondeur.....	134
Tableau III.1-2 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de HOR, concernant les enregistrements extra-locaux à régionaux (pollens, XRF, μ PC) ainsi que la perte au feu (PAF) et la susceptibilité magnétique (SM). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, IPA : indices polliniques d'anthropisation, \uparrow : augmentation, \downarrow : diminution, max. : valeur maximale	146
Tableau III.1-3 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de HOR, concernant les enregistrements locaux (pollens, MNP, MPC, graines). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, \uparrow : augmentation, \downarrow : diminution, max. : valeur maximale, mini. : valeur minimale, MNP : microfossiles non-polliniques.....	147
Tableau III.2-1 : Datations radiocarbone de la séquence de KOH. Les dates en grisé ont été écartées du modèle âge-profondeur.	153
Tableau III.2-2 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de KOH, concernant les enregistrements extra-locaux à régionaux (pollens, XRF, μ PC) ainsi que la perte au feu (PAF) et la susceptibilité magnétique (SM). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, IPA : indices polliniques d'anthropisation, \uparrow : augmentation, \downarrow : diminution, max. : valeur maximale	163
Tableau III.2-3 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de KOH, concernant les enregistrements locaux (pollens, MNP, MPC, graines). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, \uparrow : augmentation, \downarrow : diminution, max. : valeur maximale, mini. : valeur minimale	164
Tableau III.3-1 : Datations radiocarbone de la séquence de Waldeck.....	171
Tableau III.3-2: Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de WAL, concernant les enregistrements extra-locaux à régionaux (pollens, XRF, μ PC) ainsi que la perte au feu (PAF) et la susceptibilité magnétique (SM). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, IPA : indices polliniques d'anthropisation, \uparrow : augmentation, \downarrow : diminution, max. : valeur maximale	184
Tableau III.3-3 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de WAL, concernant les enregistrements locaux (pollens, MNP, MPC, graines). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, \uparrow : augmentation, \downarrow : diminution, max. : valeur maximale, mini. : valeur minimale	185
Tableau III.4-1 : Datations radiocarbone effectuées pour la séquence de Bitscherthal.....	192
Tableau VI.1-1 : Tableau résumant les différentes pratiques identifiées dans les sites du Pays de Bitche, les indices paléocologiques les caractérisant ainsi que leur période d'apparition et leur impact sur le paysage.....	274
Tableau VI.3-1 : Description de l'évolution de la diversité floristique (richesse pollinique attendue (E(Tn)) pour les trois séquences étudiées.....	301

Liste des annexes

Annexe 1 : Correspondance nom scientifique/nom vernaculaire des taxons cités (Tous les taxons sont des types polliniques identifiés dans l'étude, à l'exception des taxons indiqués par une *, qui sont observés dans la végétation actuelle.)	317
Annexe 2 : Diagramme pollinique complet des pollens d'arbres et arbustes (AP) de la séquence de la Horn en fonction de la profondeur	318
Annexe 3 : Diagramme pollinique complet des pollens de taxons herbacés de la séquence de la Horn en fonction de la profondeur	319
Annexe 4 : Résultats des analyses XRF pour la séquence de la Horn, en coups par seconde et en fonction de la profondeur	320
Annexe 5 : Diagramme pollinique complet des pollens d'arbres et arbustes (AP) de la séquence de Kobert-Haut en fonction de la profondeur	321
Annexe 6 : Diagramme pollinique complet des taxons herbacés (NAP) de la séquence de Kobert-Haut en fonction de la profondeur	322
Annexe 7 : Résultats de l'analyse XRF de la séquence de Kobert-Haut en coups par seconde et en fonction de la profondeur	323
Annexe 8 : Diagramme pollinique complet des pollens d'arbres et d'arbustes (AP) de la séquence de Waldeck en fonction de la profondeur	324
Annexe 9 : Diagramme pollinique complet des pollens de taxons herbacés (NAP) de la séquence de Waldeck en fonction de la profondeur	325
Annexe 10 : Résultats de l'analyse XRF de la séquence de Waldeck en coups par seconde et en fonction de la profondeur	326
Annexe 11 : Diagramme pollinique complet des pollens d'arbres et d'arbustes (AP) de la séquence de Bitscherthal en fonction de la profondeur	327
Annexe 12 : Diagramme pollinique complet des pollens de taxons herbacés (NAP) de la séquence de Bitscherthal en fonction de la profondeur	328
Annexe 13 : Diagramme complet des différents microfossiles non-polliniques identifiés dans la séquence de Bitscherthal en fonction de la profondeur	329
Annexe 14 : Résultats de l'analyse XRF de la séquence de Bitscherthal en coups par seconde et en fonction de la profondeur	330

Valorisation scientifique

- Publication dans des revues à comité de lecture :

Gouriveau E., Ruffaldi P., Duchamp L., Robin V., Schnitzler A., Walter-Simonnet A.-V. 2020. Holocene vegetation history in the Northern Vosges Mountains (NE France): Palynological, geochemical and sedimentological data. *The Holocene*. (<https://doi.org/10.1177/0959683620902229>)

- Publication acceptée dans une revue à comité de lecture :

Gouriveau E., Ruffaldi P., Duchamp L., Robin V., Schnitzler A., Figus C., Walter-Simonnet A.-V.. (-) From the Neolithic to the present day: impacts of human presence on biodiversity in the sandstone Northern Vosges (France) / Du Néolithique à nos jours: impacts de la présence humaine sur la biodiversité dans les Vosges du Nord gréseuses (France). *Bulletin de la Société géologique de France*, n° spécial

- Chapitre d'ouvrage :

Bégeot C., Ruffaldi P., Walter-Simonnet A.-V., Etienne D., Mariet A.-L., **Gouriveau E.** 2019. Les Vosges : des forêts et des chaumes, in: Bépoix, S., Richard, H. (Éd.), *La forêt au Moyen Âge*. Les Belles Lettres, Paris, p. 301 314.

- Participations à des colloques internationaux :

Gouriveau E., Ruffaldi P., Schnitzler A., Duchamp L., Robin V., Walter-Simonnet A.-V.. *A Holocene record of vegetation change and human land-use: a case study of Northern Vosges Mountains (France)*. MedPalyno2019, Bordeaux, 9-11 juillet 2019 (Communication orale)

Gouriveau E., Ruffaldi P., Schaal C., Robin V., Duchamp L., Schnitzler A., Walter-Simonnet A.-V.. *Did the past and recent human activities affect the Northern Vosges Mountains ecosystems during the last 3 millennia?* Sfécologie2018, Rennes, 22-25 octobre 2018 (Communication orale)

Gouriveau E., Ruffaldi P., Schaal C., Robin V., Duchamp L., Schnitzler A., Walter-Simonnet A.-V.. *Past and recent human activities impacts on Northern Vosges Mountains ecosystems during the last 3 millennia*. EGU2018, Vienne (Autriche), 8-13 avril 2018 (Poster)

- Participations à des colloques nationaux/séminaires :

Gouriveau E., Ruffaldi P., Schaal C., Robin V., Duchamp L., Schnitzler A., Walter-Simonnet A.-V.. *Comment les activités humaines ont-elles impacté les écosystèmes des Vosges du Nord au cours des 3 derniers millénaires ?* Forum des Jeunes Chercheurs, Besançon, 14-15 juin 2018 (Communication orale)

Gouriveau E., Schaal C., Ruffaldi P., Robin V., Duchamp L., Schnitzler A., Walter-Simonnet A.-V.. *Impact des activités humaines passées et récentes sur les écosystèmes des Vosges du Nord : une approche pluridisciplinaire*. 13^{ème} Rencontres d'Archéobotanique « La carpologie et l'interdisciplinarité : approches intégrées », Besse-et-St-Anastaise, 27 février-2 mars 2018 (Communication orale)

Gouriveau E., Ruffaldi P., Schaal C., Robin V., Duchamp L., Schnitzler A., Walter-Simonnet A.-V.. *Impact des activités humaines passées et récentes sur les écosystèmes des Vosges du Nord*. Quaternaire 11 « Au centre des enjeux », Orléans, 13-15 février 2018 (Poster)

Gouriveau E. *L'impact des activités humaines passées et récentes sur les écosystèmes des Vosges du Nord*. Journée d'écologie historique de Lorraine, Metz, 15 novembre 2016 (communication orale)

Plongée littéraire dans les Vosges du Nord

« Mais voilà, quoique calcinés, la myrtille, le sapin pectiné, la digitale pourpre, le chêne sessile, l'alisier blanc, le sorbier des oiseleurs, car débute ici la côte de Saverne. (...) L'accès pentu devient difficile sous un manteau forestier sec et dense où quelques loups affamés regardent, de loin, passer le convoi en faisant parfois luire leurs yeux parmi les ombres. Valse mélancolique et langoureux vertige au ras des premières falaises, quel collier de misère sur le grès vosgien de rochers partiellement abrupts. »

Jean Teulé, *Entrez dans la danse*, Paris, 2018

« Des arbres, des arbres, et des arbres. Une forêt à perte de vue, mélangeant les essences, pins et feuillus, marquée çà et là par des rochers de grès de plusieurs mètres de haut qui offraient une distraction inopinée avec leurs formes étranges. Cela faisait une demi-heure qu'il parcourait cet épais couvert végétal depuis qu'il avait quitté la route nationale. Il s'était trompé de chemin plusieurs fois, s'engageant dans des petites vallées désertes, croisant parfois de coquets hameaux bien entretenus, oasis de civilisation dans cette immensité verte. »

Camille Autain, *L'Ogre du Bitcherland*, Strasbourg, 2016

« Ici, la moindre parcelle de nature ressemblait à quelque terre sauvage. Dès qu'on quittait les alentours d'un village, on ne savait pas dans quoi on se lançait. Chaque communauté isolée, chaque hameau était une petite civilisation. Et les choses ne s'arrangeaient guère depuis qu'ils progressaient maintenant dans un pays de collines. L'horizon se fermait davantage, la forêt était étouffante, et on ne croisait plus âme qui vive. »

Camille Autain, *L'Ogre du Bitcherland*, Strasbourg, 2016

Introduction



E. Gouriveau

Sphaigne sur le parcours de la tourbière de l'étang de Hanau

1. Contexte de la recherche

Dans le contexte actuel de changement climatique, d'exploitation intensive des paysages et des écosystèmes engendrée par une croissance démographique, économique et industrielle sans précédent, ainsi que dans le contexte de la sixième crise de la biodiversité, il est essentiel de connaître la capacité des écosystèmes à absorber et répondre aux perturbations naturelles ou anthropiques afin de prédire leur évolution future (BARNOSKY *et al.*, 2011 ; DREVER *et al.*, 2006 ; FOSTER *et al.*, 2003 ; IPCC, 2019 ; MATHEVET & BOUSQUET, 2014 ; MESSERLI *et al.*, 2000). Ce comportement face aux perturbations constitue la résilience des écosystèmes : un système résilient peut absorber une perturbation (feu, vent, sécheresse, coupe forestière, utilisation agricole...) et s'y adapter tout en conservant ses fonctions essentielles, sa structure, son identité et ses interactions (DREVER *et al.*, 2006 ; MATHEVET & BOUSQUET, 2014). La résilience ou la vulnérabilité d'un écosystème sont conditionnées par ses caractéristiques intrinsèques telles que sa structure, sa composition et les interactions entre ses différents composants (DREVER *et al.*, 2006 ; MATHEVET & BOUSQUET, 2014 ; PETERSON *et al.*, 1998).

Or, bien que les grands changements climatiques du passé aient été un des principaux facteurs influençant la mise en place des écosystèmes et notamment de la végétation, il est maintenant bien établi que l'homme et ses activités ont impacté et impactent encore les processus naturels (BIRKS, 2012 ; FOSTER *et al.*, 2003 ; MESSERLI *et al.*, 2000). De nombreuses études ont également montré que l'action anthropique passée sur les paysages a engendré des modifications qui sont encore visibles de nos jours et qui constituent l'héritage historique dans les paysages actuels (BIRKS, 2012 ; FOSTER *et al.*, 2003 ; MESSERLI *et al.*, 2000).

Ainsi, certains milieux et certaines associations végétales actuels sont directement ou indirectement issus des impacts anthropiques du passé ou ont été fortement modifiés sous la pression humaine (BIRKS, 2012). C'est le cas par exemple des forêts dont l'exploitation est directement ou indirectement liée à la croissance démographique et dont la structure, la composition spécifique, la répartition des espèces et la fonction ont largement été impactées par les activités humaines (DREVER *et al.*, 2006 ; FOSTER *et al.*, 2003 ; MATHER *et al.*, 1998). En effet, au cours du temps, les milieux boisés ont été abondamment exploités et fragmentés, notamment par l'utilisation agricole des déboisements et par l'urbanisation, et une perte de biodiversité a souvent mené à une homogénéisation de leur composition spécifique (DREVER

et al., 2006 ; FLINN & VELLEND, 2005 ; FOSTER *et al.*, 2003 ; HERMY & VERHEYEN, 2007). Plusieurs études de sols actuellement sous forêt ont également montré que, même très ancienne, l'utilisation comme zone de culture de ces terrains après déboisement a fortement et durablement influencé les caractéristiques du sol (fertilité, pH, nutriments...) (DUPOUEY *et al.*, 2002 ; FLINN & VELLEND, 2005 ; HERMY & VERHEYEN, 2007 ; KOERNER *et al.*, 1997). De plus, les populations humaines et leurs activités ont également entraîné, volontairement ou non, l'introduction de nouvelles espèces considérées comme exotiques qui sont parfois devenues invasives et ont menacé les espèces indigènes, engendrant parfois leur disparition (WILLIS & BIRKS, 2006).

Toutes ces modifications écologiques, héritées de l'utilisation passée du paysage peuvent alors altérer la résilience des écosystèmes (DREVER *et al.*, 2006 ; FOSTER *et al.*, 2003 ; MESSERLI *et al.*, 2000). C'est ce qui est par exemple observé dans le cas des forêts : une forêt ancienne avec une grande diversité de structures et une composition spécifique diversifiée résiste plus facilement aux perturbations qu'une forêt récente moins diversifiée issue d'une recolonisation de zones agricoles abandonnées ou encore qu'une forêt plantée dont l'homogénéité extrême augmente la susceptibilité aux tempêtes, aux incendies, aux attaques d'insectes et à la propagation des maladies (DREVER *et al.*, 2006 ; FLINN & VELLEND, 2005 ; HERMY & VERHEYEN, 2007).

Il est donc essentiel d'identifier les perturbations qui ont induit l'héritage historique actuel et façonné les écosystèmes, ainsi que d'identifier comment ces derniers y ont répondu afin de reconstituer leur histoire et d'appréhender les différents états de leur dynamique (BIRKS, 2012 ; FOSTER *et al.*, 2003 ; JACKSON & HOBBS, 2009). Autant de connaissances qui sont indispensables pour augmenter l'efficacité des actions de gestion, de conservation et de restauration qui sont menées par de nombreuses institutions, organismes, associations ou réseaux (Conservatoires d'espaces naturels, Office National des Forêts, Réserves Naturelles de France, Parcs naturels régionaux de France...) pour maintenir les écosystèmes et les milieux menacés, dégradés ou détruits par l'action de l'homme. En effet, restaurer la « naturalité » d'un écosystème implique l'identification de cet état dit « naturel » et donc la connaissance de(des) l'état(s) antérieur(s) à la perturbation du milieu à restaurer afin d'établir au mieux l'objectif à atteindre (FOSTER *et al.*, 2003 ; JACKSON & HOBBS, 2009 ; WILLIS & BIRKS, 2006). De plus, restaurer ou conserver un milieu dans le contexte actuel de changement climatique rapide oblige à connaître la capacité de

réponse de ce milieu aux perturbations d'origine climatique afin d'anticiper les modifications futures et d'adapter au mieux la politique de gestion (JACKSON & HOBBS, 2009).

Cependant, les recherches sur lesquelles repose l'élaboration des politiques de gestion sont réalisées sur des intervalles de temps extrêmement courts à l'échelle de la durée de vie des écosystèmes (rarement plus de 50 ans) (JACKSON & HOBBS, 2009 ; MESSERLI *et al.*, 2000 ; WILLIS & BIRKS, 2006). Or, ces intervalles de temps ne permettent pas de percevoir la diversité des perturbations et leurs impacts sur les écosystèmes qui sont pourtant essentiels pour prédire les évolutions futures (MESSERLI *et al.*, 2000).

Dans ce contexte, les analyses paléoécologiques et parmi elles la palynologie, apportent une aide précieuse pour la mise en place des politiques de gestion des milieux. Malheureusement, peu d'interactions existent entre la biologie de la conservation et la paléoécologie car les données apportées par cette dernière sont souvent considérées comme trop descriptives et pas assez précises pour répondre aux problématiques écologiques actuelles (BIRKS, 2012). Pourtant, l'étude des archives paléoenvironnementales, enregistrant les variations des composantes (végétales, pédologiques, hydrologiques...) d'un écosystème sur un intervalle de temps long, permet de reconstituer son histoire à très long terme et donc d'établir ses états antérieurs à une perturbation (BIRKS, 2012 ; JACKSON & HOBBS, 2009 ; WILLIS & BIRKS, 2006). Les disciplines de la paléoécologie permettent ainsi d'identifier la réponse d'un écosystème à une perturbation d'origine anthropique au sein d'une dynamique naturelle et aident alors à définir avec moins d'incertitude ce qui peut être considéré comme « l'état naturel » (WILLIS & BIRKS, 2006). De plus, pouvoir identifier la réponse à court ou long terme de l'écosystème à toutes perturbations passées permet d'appréhender sa résilience (BIRKS, 2012 ; JACKSON & HOBBS, 2009). Les études paléoécologiques permettent également d'identifier l'origine anthropique d'un milieu possédant des valeurs écologiques particulières, comme par exemple une importante biodiversité, et apportent des informations sur les pratiques passées qui les ont façonnés (FOSTER *et al.*, 2003). La palynologie apporte en cela une aide précieuse pour distinguer le statut indigène ou exotique d'une espèce végétale (BIRKS, 2012).

De nombreuses avancées méthodologiques concernant les analyses paléoécologiques ont rendu évident l'apport de ces études aux problématiques de la biologie de la conservation (BIRKS, 2012). Parmi ces avancées, le développement des analyses multi-proxy (multi-indicateurs) permet d'augmenter les connaissances de l'évolution passée des paysages et des

écosystèmes. En effet, croiser de nombreuses disciplines et donc d'indicateurs permet d'appréhender un écosystème ou un paysage dans toute sa complexité en étudiant ses différents paramètres et ses composantes à différentes échelles et leurs interactions au sein des systèmes (BIRKS & BIRKS, 2006). Les analyses croisant l'étude des pollens et des microfossiles non-polliniques permettent, par exemple, l'identification des pratiques humaines liées au pastoralisme ou la reconstitution des conditions écologiques d'un milieu (BAKER *et al.*, 2013 ; BARTHELMES *et al.*, 2012 ; CUGNY *et al.*, 2010 ; DAVIS & SHAFER, 2006 ; DOYEN & ETIENNE, 2017 ; ETIENNE, 2011 ; REVELLES & VAN GEEL, 2016 ; VAN GEEL, 1978 ; VAN GEEL *et al.*, 2003 ; YELOFF *et al.*, 2007). Les études des charbons et des particules carbonisées offrent quant à elles un aperçu de l'histoire des feux qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique (CONEDERA *et al.*, 2009 ; MOONEY & TINNER, 2011 ; NELLE *et al.*, 2013 ; PATTERSON *et al.*, 1987). De plus, le croisement des analyses polliniques, anthracologiques et géochimiques a été utilisé dans de nombreuses études pour identifier les phases d'activités minières et métallurgiques et reconstituer leurs impacts sur l'environnement (BREITENLECHNER *et al.*, 2010 ; JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007 ; MARIET *et al.*, 2016 ; MIGHALL *et al.*, 2017 ; VON SCHEFFER *et al.*, 2019). Ainsi, une étude croisée des pollens, des microfossiles non-polliniques, des particules carbonisées et de la géochimie du sédiment offrent la possibilité d'identifier les nombreuses activités humaines et de comprendre leur impact sur le paysage.

Les activités humaines, et par elles l'histoire des sociétés, et l'évolution des environnements sont étroitement liées et constituent un système complexe appelé système socio-écologique dans lequel l'Homme et son milieu sont en interaction dynamique (MATHEVET & BOUSQUET, 2014). Il est donc important de concevoir l'Homme dans son milieu et de les étudier à la lumière l'un de l'autre afin de comprendre et de caractériser ce système complexe. Ainsi, en plus de croiser les disciplines paléoenvironnementales entre elles, il est nécessaire de les croiser avec les disciplines des sciences humaines et sociales et d'aborder les relations Homme-environnement-climat par différentes approches (archéologie, histoire, géographie historique...) (JOUFFROY-BAPICOT, 2010 ; MATHEVET & BOUSQUET, 2014 ; THIEBAULT, 2012).

Malgré l'apport des analyses multi-proxy et interdisciplinaires pour la compréhension des écosystèmes actuels, aucune analyse de ce type n'a encore été menée dans la région du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord (Figure 1-1, nord-est de la France), classé en Réserve de

Biosphère par l'UNESCO depuis 1989. Cette région comprend également sur son territoire une Réserve Naturelle et de nombreux sites faisant partie du réseau européen de sites Natura 2000. Pour ces différentes structures qui gèrent de nombreux milieux et mènent des actions de conservation et de restauration, la réalisation d'analyses paléoécologiques multi-proxy dans la région apporterait ainsi des informations indispensables à la connaissance et à la compréhension des écosystèmes.

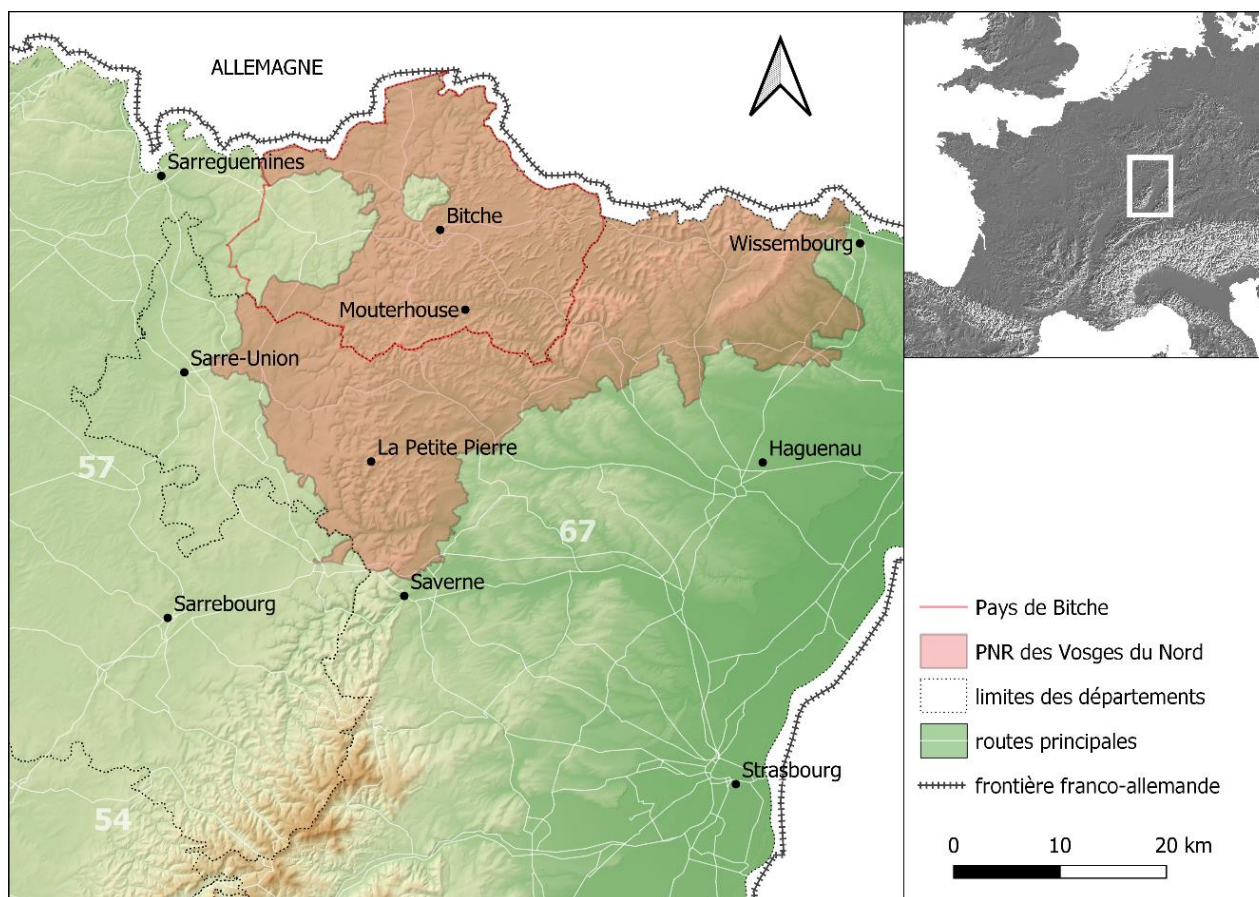


Figure 1-1 : Localisation des Vosges du Nord et du Pays de Bitche (auteur: E.Gouriveau, source : BD ALTI2 ©IGN, ROUTE120® ©IGN, ADMIN-EXPRESS ©IGN)

De plus, la conduite de ces analyses est rendue possible dans les Vosges du Nord grâce à la présence de tourbières acides à basse altitude (250-300 m) qui constituent de bonnes archives (CHAMBERS & CHARMAN, 2004). Cependant, malgré la présence de ces nombreuses tourbières, très peu d'études palynologiques ont été menées dans cette région, alors que les régions alentours ont, quant à elles, fait l'objet de nombreuses analyses.

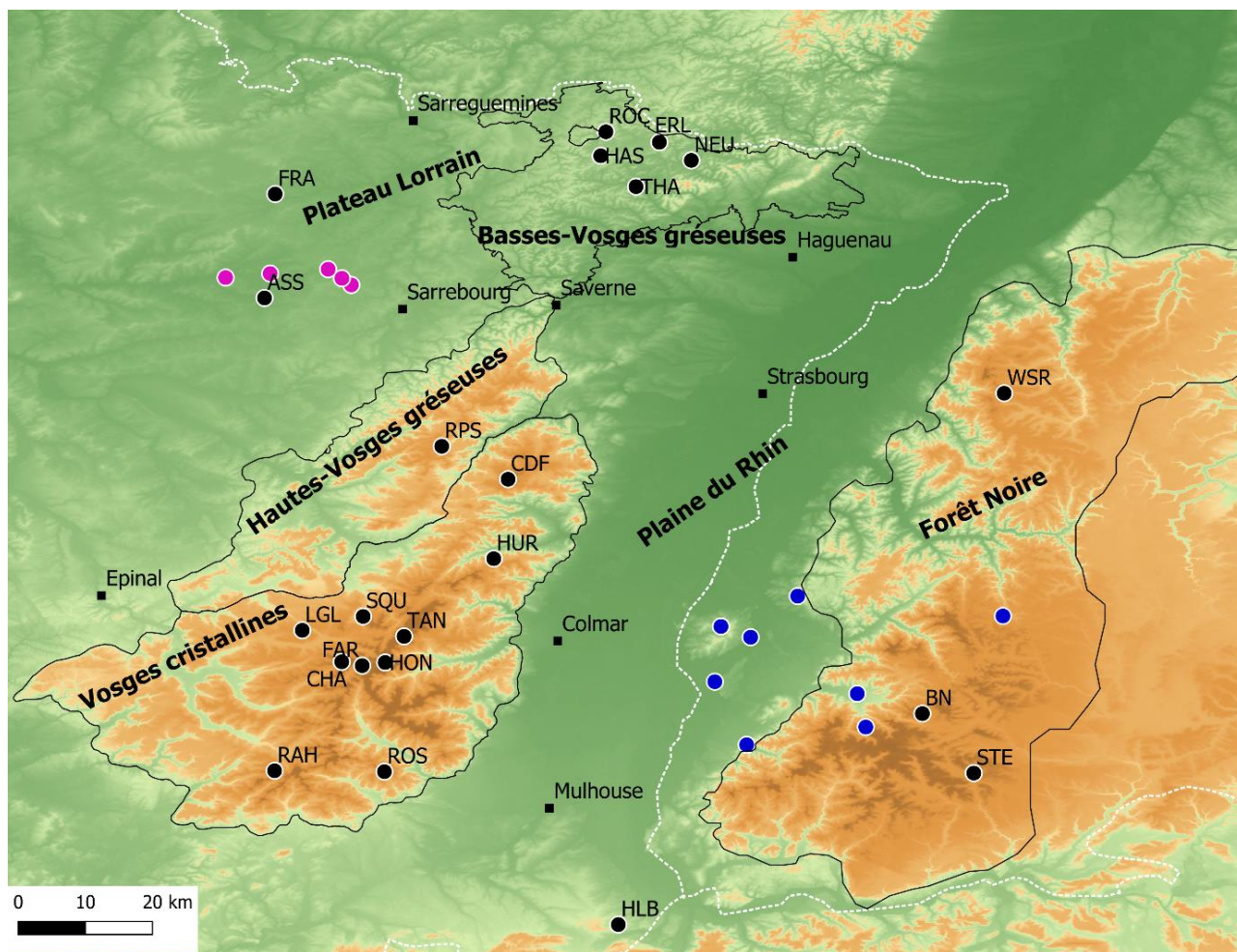
2. Synthèse des études polliniques dans la région d'étude

2.1. Le Massif des Vosges et les régions voisines

La synthèse des recherches palynologiques menées dans le Massif des Vosges réalisée par Pim DE KLERK (2014) témoigne de l'abondance des séquences analysées dans cette région (Figure 2-1). Cette synthèse montre également que la plupart des analyses sont antérieures aux années 1990 et que très peu d'entre elles ont fait l'objet de datations radiocarbone offrant un calage chronologique fiable. Cependant, ces études permettent d'appréhender les grandes phases de l'histoire post-glaciaire de la végétation et pour les plus détaillées, de percevoir l'histoire de l'anthropisation du Massif Vosgien.

Autour du Massif des Vosges, d'autres régions, comme la Forêt Noire ou encore des régions de basse altitude comme le Plateau Lorrain, ont également livré des archives naturelles (tourbières, mardelles intra-forestières...) permettant la reconstruction de l'histoire de la végétation et l'identification des différentes phases d'impact anthropique (ETIENNE, 2011 ; ETIENNE *et al.*, 2013 ; MÄCKEL *et al.*, 2009 ; RÖSCH, 2007, 2000 ; RUFFALDI, 1999 ; RUFFALDI *et al.*, 2015, 2007). En revanche, la Plaine du Rhin (ou Plaine d'Alsace) n'a fait l'objet que de très rares études, du fait de la rareté des zones humides.

Figure 2-1 : (page suivante) Localisation des études citées dans le texte : ASS – mardelle d'Assenoncourt, 233 m alt. (ETIENNE *et al.*, 2013, RUFFALDI *et al.*, 2007) ; BN – Breitnau-Neuhof, 985 m alt. (RÖSCH, 2000) ; CDF – tourbière du Champ du Feu, 1049 m alt. (MARIET, 2016) ; CHA – tourbière de Chajoux, 850 m alt. (JANSSEN & BRABER, 1987) ; ERL – tourbière de l'Erlenmoos, 285 m alt. (DUBOIS *et al.*, 1938) ; FAR – tourbière de la Feigne d'Artimont, 1100 m alt. (JANSSEN *et al.*, 1975) ; FRA – bas marais de Francaltroff, 298 m alt. (RUFFALDI, 1999, RUFFALDI *et al.*, 2015) ; HAS - Prairie de l'Hasselfurterweier, 285 m alt. (HATT, 1937) ; HLB – paléochenal d'Hagenthal-le-Bas, 361 m alt. (RICHARD *et al.*, 2016) ; HON – massif du Hohneck, 1361 m alt. (KALIS, 1985) ; HUR – séquence du Hury, 650 m alt. (MARIET *et al.*, 2016, MARIET, 2016) ; LGL – tourbière de La Goutte Loiselot, 835 m alt. (EDELMAN, 1985) ; NEU - tourbière du Neudoerfel, 235-250 m alt. (HATT, 1937) ; RAH – tourbière du Rahin, 916 m alt. (DRESCH *et al.*, 1966) ; ROC - tourbière du Rochathof, 289 m alt. (HATT, 1937) ; ROS – massif du Rossberg, 1191 m alt. ; RPS – tourbière du Rond Pertuis supérieure, 690 m alt. (SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015) ; SQU – tourbière de Squainfaing, 750 m alt. (DARMOIS-THEOBALD *et al.*, 1976) ; STE – tourbière de Steerenmoos, 1000 m alt. (RÖSCH, 2000) ; TAN – tourbière du Tanet, 1230 m alt. (JANSSEN & JANSSEN-KETTLITZ, 1972) ; THA - tourbière de Thalhaueuseln, 209 m alt. (HATT, 1937) ; WSR – lac de Wilder See am Ruhestein, 910 m alt. (RÖSCH, 2007) ; points roses : mardelles du Plateau Lorrain étudiées par ETIENNE, 2011, ETIENNE *et al.*, 2013 ; points bleus : sites de la synthèse de MÄCKEL *et al.*, 2009 (auteur : E.Gouriveau, source : CIAT-CSI SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org>))



2.1.1. Les grands traits de l'histoire de la végétation

Plusieurs synthèses des données polliniques disponibles pour le Massif des Vosges ont permis d'établir un diagramme pollinique théorique (Figure 2-2) et de reconstituer les grandes phases de l'histoire de la végétation forestière que l'on retrouve dans la grande majorité des séquences de la région et qui sont similaires à celles identifiées à l'échelle de l'Europe de l'Ouest (BEGEOT & DOYEN, 2019 ; DE KLERK, 2014 ; GUILLET *et al.*, 1976).

Dans ce diagramme théorique, la première phase observée est une phase de pins et de bouleaux qui s'étend entre 11500 et environ 10800 cal. BP (Figure 2-2, DE KLERK, 2014). Cette phase est enregistrée de manière synchrone sur le Plateau Lorrain, entre 11500 et 10500 cal. BP (tourbière de Francaltroff, Figures 2-1 et 2-2) (RUFFALDI, 1999 ; RUFFALDI *et al.*, 2015).

Dans ces deux régions, la deuxième phase est caractérisée par la forte propagation du noisetier et la régression du pin (Figure 2-2, DE KLERK, 2014 ; GUILLET *et al.*, 1976 ; RUFFALDI *et al.*, 2015). La séquence de la Feigne d'Artimont (Vosges cristallines, Figure 2-1) débute à la fin de la phase du pin autour de 10300-10000 cal. BP (JANSSEN *et al.*, 1975). La chute du pin et la phase

à noisetier sont également observées, mais un peu plus tardives dans les séquences de la Forêt Noire, à partir de 8000 cal. BC (9950 cal. BP) (tourbières de Steerenmoos et Breitnau-Neuhof, Figure 2-1) (RÖSCH, 2000).

Dans les Vosges cristallines, le pin disparaît quasiment autour de certaines tourbières (tourbière du Rahin, Figure 2-1) alors que dans certaines séquences, ces pourcentages polliniques diminuent mais restent assez importants et une phase de noisetiers et de pins se met en place, comme observé dans la séquence de la Feigne d'Artimont (DRESCH *et al.*, 1966 ; JANSSEN *et al.*, 1975 ; LEMEE, 1963).

Lors de la phase du noisetier, d'autres taxons thermophiles se propagent dans toutes les régions, et notamment les taxons de la chênaie diversifiée (*Ulmus, Quercus*), dont la propagation se fait de manière différente en fonction des régions et de l'altitude. Ainsi, ces taxons forment parfois une zone très large à noisetiers, chênes, ormes, tilleuls et frênes ou, une phase de noisetier et chênaie qui précède une phase de chênaie diversifiée dominante (Figure 2-2, DE KLERK, 2014 ; LEMEE, 1963). Dans les Vosges cristallines, par exemple, la séquence de la Feigne d'Artimont enregistre une phase à noisetiers, chênes, ormes, tilleuls et frênes de 7465±70 BP (environ 8300 cal. BP) à 5750±75 BP (soit 6550 cal. BP) alors que dans la tourbière de Squainfaing (Figure 2-1), la phase de la chênaie diversifiée succède à une phase de noisetier et chênaie diversifiée (DARMOIS-THEOBALD *et al.*, 1976 ; JANSSEN *et al.*, 1975). En Forêt Noire, la chênaie diversifiée se propage à partir de 8000 cal. BC (soit 9950 cal. BP). Sur le Plateau Lorrain, l'orme se propage à partir de 9500 cal. BP, suivi par le chêne et le tilleul peu après 8500 cal. BP (Figure 2-2, RUFFALDI *et al.*, 2015). Au sud de la Plaine du Rhin (Hagenthal-le-Bas, Figure 2-1), la chênaie diversifiée se développe plus tardivement, à partir de 5500 cal. BP, de manière synchrone avec le noisetier qui reste très dominant pendant toute la phase (RICHARD *et al.*, 2016).

Dans le diagramme pollinique théorique des Vosges, la phase de la hêtraie-sapinière succède à la phase de la chênaie diversifiée vers 5700 cal. BP, indiquant un refroidissement et une augmentation sensible de la pluviométrie (Figure 2-2, DE KLERK, 2014 ; GUILLET *et al.*, 1976). En Forêt Noire, le début de la phase de la hêtraie-sapinière est daté autour de 4000 cal. BC, soit 5950 cal. BP, et donc contemporain de ce qui est observé dans les Vosges (RÖSCH, 2000).

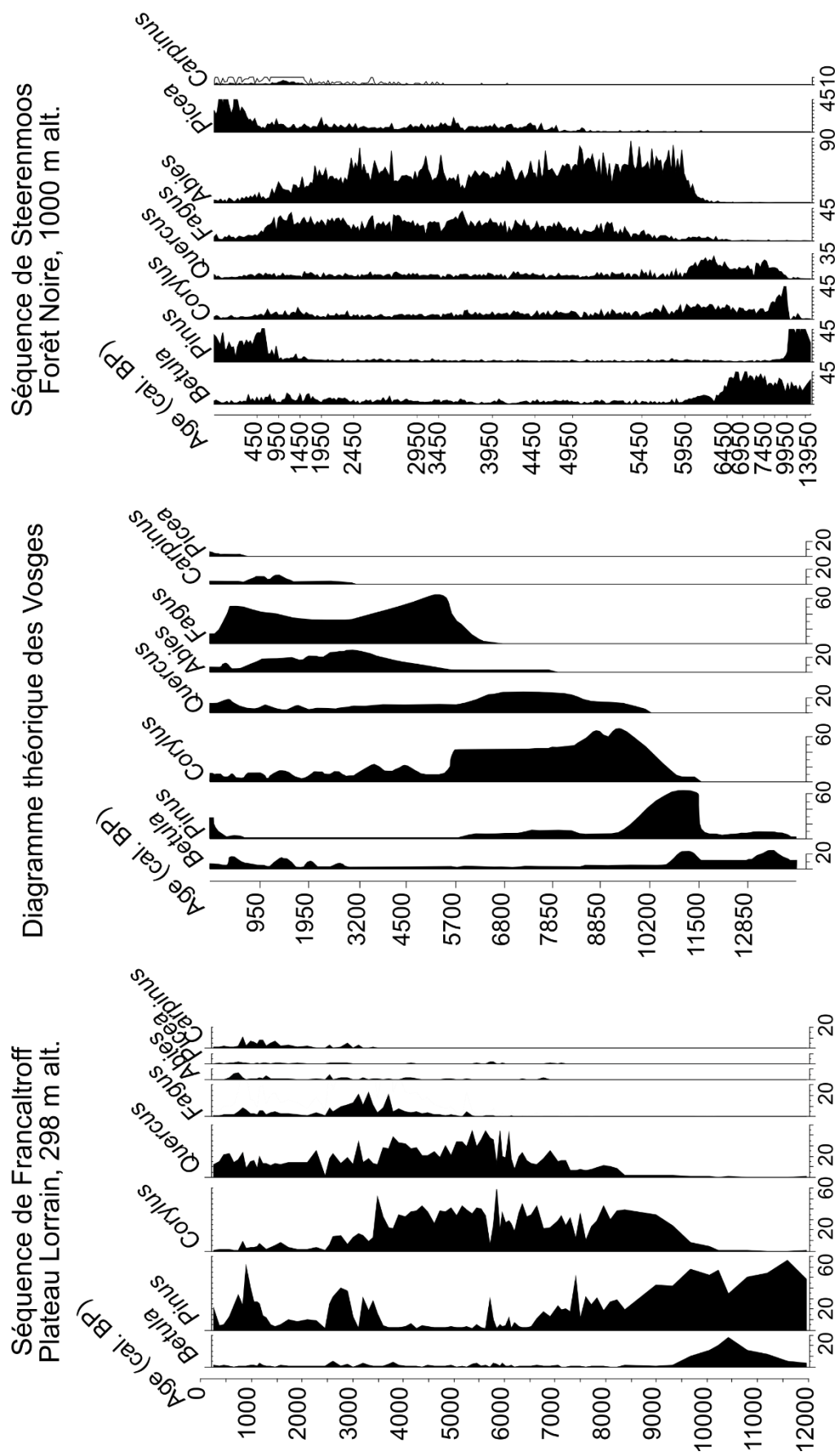


Figure 2-2 : Diagrammes polliniques simplifiés représentant l'évolution des principaux taxons arboréens sur le Plateau Lorrain, dans le Massif des Vosges et en Forêt Noire (modifié d'après : DE KLERK, 2014, RÖSCH, 2000, RUFFALDI *et al.*, 2015)

Le développement du hêtre et du sapin sont clairement identifiés dans la plupart des diagrammes des Vosges et la transition entre la chênaie mixte et la hêtraie-sapinière est assez rapide (DE KLERK, 2014 ; JANSSEN *et al.*, 1975). Mais là encore, il existe des séquences dans lesquelles la propagation est plus progressive et forme une phase mixte de chênaie diversifiée et hêtraie, comme dans les séquences de la tourbière du Rahin et de la tourbière de La Goutte Loiselot (Figure 2-1, DRESCH *et al.*, 1966 ; EDELMAN, 1985 ; LEMEE, 1963). De plus, en fonction de l'altitude des tourbières étudiées, la propagation du hêtre intervient plus ou moins tôt, résultant probablement de l'augmentation des précipitations plus précoces en altitude. Cela est bien mis en évidence par la comparaison de la séquence de la Feigne d'Artimont (1100 m alt.) et de celle du Rond Pertuis supérieure (690 m alt.), où le hêtre et le sapin se propagent respectivement à partir de 5750 ± 75 BP (soit vers 6550 cal. BP) et de 4000 cal. BC (soit environ 5950 cal. BP) (JANSSEN *et al.*, 1975 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015). De même, à plus faible altitude encore, la propagation du hêtre est plus tardive, observée à partir de 4500 cal. BP dans la séquence de Francaltroff (298 m alt.) sur le Plateau Lorrain (Figure 2-2) et seulement autour de 3000 cal. BP dans la séquence du sud de la Plaine d'Alsace (361 m alt.) (RICHARD *et al.*, 2016).

La propagation du charme est datée autour de 3500 cal. BP sur le Plateau Lorrain alors qu'elle est plus tardive dans les Vosges, intervenant lors de la phase de la hêtraie-sapinière, après 3200 cal. BP, comme par exemple dans la séquence de la Feigne d'Artimont où il se développe autour de 2850 cal. BP (Figure 2-2, DE KLERK, 2014 ; GUILLET *et al.*, 1976 ; JANSSEN *et al.*, 1975 ; RUFFALDI *et al.*, 2015). Dans la Forêt Noire, le début de la courbe continue du charme est encore plus récent, daté vers 2449 ± 77 BP (soit autour de 2535 cal. BP) dans la séquence de la tourbière de Steerenmoos (Figure 2-2, RÖSCH, 2000).

Le développement de l'épicéa caractérise souvent le sommet des séquences, généralement après 1000 BP (environ 900 cal. BP) dans les Vosges cristallines comme le montre l'étude de KALIS (1984). Cependant, dans certaines séquences quelques pollens de *Picea* sont identifiés plus tôt comme par exemple dans les analyses menées par LEMEE (1963) où ils sont déjà présents sporadiquement dans la phase de chênaie diversifiée ou dans le massif du Hohneck où ils sont présents depuis 1600 BP (soit environ 1480 cal. BP) (KALIS, 1985). En Forêt Noire, la séquence de la tourbière de Steerenmoos montre une augmentation de leur pourcentage autour de 4665 cal. BP qui s'intensifie vers 170 cal. BP (Figure 2-2, RÖSCH, 2000).

2.1.2. Données sur l'anthropisation de la région

En Forêt Noire, la première phase d'impact humain est perçue dès le Mésolithique, autour de 6900 BP (soit ~7735 cal. BP) et est caractérisée par les premiers pollens de céréales, de *Plantago lanceolata* et de ceux de nombreux autres taxons herbacés héliophiles, ainsi que par la présence de charbons et la diminution des pourcentages de certains taxons arboréens (RÖSCH, 2000). Trois autres phases de présence humaine sont également identifiées par la suite dont l'une est caractérisée par la pratique du pâturage en forêt (5350 cal. BP). Sur le Plateau Lorrain, les premières traces d'anthropisation, très faibles, sont enregistrées au cours du Néolithique, vers 6800 cal. BP (RUFFALDI *et al.*, 2015). Dans le sud de la Plaine du Rhin Supérieur, les premiers pollens de céréales et de plantes liées aux cultures apparaissent à partir de 4000 cal. BC (soit 5950 cal. BP), lors de l'Optimum Climatique de l'Holocène (MÄCKEL *et al.*, 2009).

Dans les Vosges, les premiers indices d'anthropisation datent également du Néolithique. Ainsi, dans les Hautes Vosges gréseuses, les indices d'une première culture des céréales et d'un pâturage en forêt sont enregistrés entre 4000 et 2500 cal. BC (soit 5950-4450 cal. BP) et dans les Vosges cristallines, KALIS (1985) identifie les premières traces ténues de déboisement autour de 4000 BP (~4500 cal. BP) (SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015).

Les indices d'occupation humaine se multiplient ensuite dans la plupart des séquences et attestent donc de l'intensification des impacts humains sur le paysage au cours de l'Âge du Bronze. La première période de l'Âge du Bronze est ainsi marquée par une augmentation de la surface des milieux ouverts, notamment pour l'agriculture (culture et élevage) dans le sud de la Plaine du Rhin Supérieur (MÄCKEL *et al.*, 2009). Une première phase d'augmentation de la pression anthropique est perçue dans les Vosges cristallines entre 3775 et 3525 BP (4150-3800 cal. BP), avec un maximum des NAP et des indices d'exploitation des chênaies. Elle est contemporaine d'une phase de pâturage en forêt identifiée entre 2200 et 1800 cal. BC (soit 4150-3750 cal. BP) dans les Hautes-Vosges gréseuses (KALIS, 1985 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015).

En Forêt Noire, l'identification des premiers pollens de seigle, la présence de *Plantago lanceolata* et la chute des pourcentages du sapin, de l'orme et du tilleul sont également perçus à l'Âge du Bronze, entre 1900 et 1700 cal. BC (soit 3850-3650 cal. BP) (RÖSCH, 2000). Sur le Plateau Lorrain, les défrichements sont plus marqués à partir de 3500 cal. BP, alors que les premières traces de culture des céréales, liées à des défrichements, sont enregistrées plus

tardivement dans les Vosges cristallines entre 2925 et 2725 BP (soit 3100-2800 cal. BP) (KALIS, 1985 ; RUFFALDI *et al.*, 2015). De manière contemporaine, à partir de 1200 cal. BC (3150 cal. BP), la première diminution distincte des pourcentages des pollens d'arbres est observée en Forêt Noire (tourbière de Steerenmoos) (RÖSCH, 2000).

En revanche, la seconde partie de l'Âge du Bronze est marquée par un abandon des milieux ouverts et un retour de la forêt au sud de la Plaine du Rhin Supérieur où le climat est devenu plus humide et plus froid (MÄCKEL *et al.*, 2009). Cette dégradation du climat s'intensifie à la fin de l'Âge du Bronze, autour de 800 cal. BC (2750 cal. BP), et est connue comme l'une des principales péjorations climatiques de l'Holocène (MÄCKEL *et al.*, 2009). Cette phase plus humide est également enregistrée dans les Vosges cristallines où elle engendre une phase de déprise des activités anthropiques autour de 2675 BP (soit ~2800 cal. BP).

Les activités anthropiques sont à nouveau identifiées à partir de la fin du premier Âge du Fer (Hallstatt) et une très importante intensification des pratiques humaines a lieu au cours du second Âge du Fer dans les Vosges cristallines (massif du Hohneck, tourbière du Tanet, tourbière du Chajoux), la Forêt Noire (tourbière de Steerenmoos, lac de Wilder See am Ruhestein), la Plaine du Rhin Supérieur et sur le Plateau Lorrain (Francaltroff, mardelles) (ETIENNE *et al.*, 2013 ; JANSSEN & BRABER, 1987 ; JANSSEN & JANSSEN-KETTLITZ, 1972 ; KALIS, 1985 ; MÄCKEL *et al.*, 2009 ; RÖSCH, 2007, 2000 ; RUFFALDI *et al.*, 2015). Ainsi, dans les Vosges cristallines, l'occupation s'intensifie et la culture des céréales ainsi que le pastoralisme sont attestés, tout comme dans les Hautes-Vosges gréseuses où les pollens de céréales, absents depuis leur première apparition au Néolithique, sont à nouveau enregistrés (KALIS, 1985 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015). C'est également de l'Âge du Fer que date l'ouverture des Hautes-Chaumes sur le massif du Rossberg (GOEPP, 2007 ; GOEPP *et al.*, 2007 ; SCHWARTZ *et al.*, 2005). Sur le Plateau Lorrain, le second Âge du Fer est caractérisé par une quasi disparition des pollens d'arbres et une très importante augmentation des plantes cultivées et des IPA (RUFFALDI *et al.*, 2015). Dans le sud de la Forêt Noire, des activités minières sont également attestées dès l'Âge du Fer (MÄCKEL *et al.*, 2009).

La période romaine est marquée par un impact croissant des activités humaines sur le paysage, notamment avec l'intensification des pratiques agropastorales dans la plupart des séquences, l'apparition du noyer, du châtaigner et de la vigne, ainsi que l'intensification des activités minières et les nombreuses constructions (villes, routes...) (MÄCKEL *et al.*, 2009).

En revanche, au massif du Hohneck, les champs et les prairies sont abandonnés et colonisés par la forêt, probablement à cause de l'exode des populations vers les plaines. Les Hautes-Chaumes du massif du Rossberg se referment également après le second Âge du Fer (GOEPP *et al.*, 2007 ; KALIS, 1985). De même, plusieurs séquences de la Forêt Noire, des Vosges et du Plateau Lorrain enregistrent une phase de déprise et/ou un retour des arbres contemporains de l'effondrement de l'Empire Romain et de la période des Grandes Invasions (JANSSEN & JANSSEN-KETTLITZ, 1972 ; MÄCKEL *et al.*, 2009 ; RÖSCH, 2007, 2000 ; RUFFALDI *et al.*, 2007).

Le Moyen Âge est la période durant laquelle les activités humaines se diversifient et les défrichements s'intensifient dans toutes les séquences des Vosges et des régions alentour. Ainsi, en Forêt Noire, le Moyen Âge est l'époque d'une modification majeure des paysages et de la végétation avec des déforestations importantes (RÖSCH, 2000). Dans les Vosges cristallines, au massif du Hohneck, le début du Haut Moyen Âge (1500-1250 BP, 1390-1190 cal. BP) est marqué par une période de défrichement des prairies et des champs abandonnés à la période précédente (KALIS, 1985).

De même, sur le Plateau Lorrain (mardelle d'Assenoncourt), une importante phase d'anthropisation est enregistrée au Haut Moyen Âge et est caractérisée par des déforestations et une diversification des cultures, avec notamment la culture du chanvre dont le rouissage est effectué dans la mardelle (RUFFALDI *et al.*, 2007).

À l'inverse, dans de très nombreuses séquences, le Haut Moyen Âge est une période de déprise, ou de réduction de la pression anthropique. C'est le cas par exemple dans les Hautes-Vosges gréseuses où les activités humaines sont représentées par du pastoralisme et une culture des céréales limitée jusqu'au Moyen Âge Central, ou encore dans certaines régions des Vosges cristallines où les études pédoanthracologiques montrent un abandon des Hautes-Chaumes, confirmé par les analyses polliniques qui attestent également d'une reconquête forestière (BEGEOT *et al.*, 2019 ; GOEPP, 2007 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015). De même, sur le Plateau Lorrain, plusieurs séquences montrent une pression anthropique faible du VI^{ème} au XI^{ème} siècle (BEGEOT *et al.*, 2019 ; ETIENNE *et al.*, 2013 ; RUFFALDI *et al.*, 2015).

Dans toutes ces régions, comme en Forêt Noire, la reprise des déforestations et l'intensification des pratiques anthropiques et de leurs impacts sur le paysage débute réellement à partir des XI^{ème} et XII^{ème} siècles, lors de l'Optimum Climatique Médiéval (1000-1300 cal. AD) au cours duquel une phase d'implantation de monastères et d'abbayes a lieu

dans le Massif Vosgien (BEGEOT *et al.*, 2019). Une phase d'anthropisation résultant de l'implantation d'un couvent est ainsi observée dans la tourbière du Tanet vers 1245±65 (soit 1176 cal. BP) et la fondation d'un monastère en 937 cal. AD (soit ~1010 cal. BP) est contemporaine d'activités minières enregistrées dans la tourbière du Hury (vallée de Sainte-Marie-aux-Mines) (JANSSEN & JANSSEN-KETTLITZ, 1972 ; MARIET *et al.*, 2016). Dans ces deux tourbières, les activités humaines s'intensifient encore par la suite, avec une culture des céréales et des déforestations plus importantes. Dans la tourbière du Hury, la culture du *Cannabis/Humulus*, la pratique du pâturage en forêt et des activités minières sont également identifiés.

Sur le Plateau Lorrain, le XI^{ème} siècle correspond également à l'expansion de l'exploitation du sel dans la région, nécessitant de grandes quantités de bois (BEGEOT *et al.*, 2019 ; ETIENNE *et al.*, 2013). Cette période marque également le début de l'augmentation progressive de la pression anthropique sur le paysage, qui dure jusqu'à la fin du Moyen Âge.

À partir du XII^{ème} siècle (1150-1700 cal. AD, 800-250 cal. BP), la séquence de la tourbière du Rond Pertuis supérieure enregistre un déboisement partiel des forêts qui sont alors fortement altérées aux alentours de la tourbière, notamment par la production de charbon pour alimenter la métallurgie de la vallée de la Bruche, ainsi que par la culture des céréales qui se diversifie et par celle du chanvre pour l'industrie textile qui se développe (SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015).

Les impacts humains de l'époque moderne sont rarement abordés dans les analyses polliniques mais deux thèses récentes ont étudié, pour l'une, les séquences des mardelles intra-forestières du Plateau Lorrain (ETIENNE, 2011) et pour l'autre, l'impact des activités minières dans les Vosges (vallée de Sainte-Marie-aux-Mines) (MARIET, 2016). Ces études multi-proxy récentes ont permis de reconstituer l'histoire des interactions homme-environnement et d'étudier les impacts des activités humaines sur les paysages et sur la végétation.

Sur le Plateau Lorrain, la période de transition entre le Moyen Âge et la Période Moderne (550-250 cal. BP) est marquée par l'attribution de forêts aux salines pour assurer leur approvisionnement en combustible (ETIENNE, 2011 ; ETIENNE *et al.*, 2013). En revanche, la pression agropastorale diminue, liée à un changement de l'utilisation du paysage qui varie en fonction des sites et les indices d'anthropisation sont réduits mais atteste encore de pratiques agricoles et pastorales à la lisière des forêts. Durant cette période, les mardelles enregistrent

une dynamique de recolonisation forestière liée à la gestion des forêts avec une exploitation en taillis à courte rotation (35 ans) qui dure du XV^{ème} siècle à la Révolution Industrielle. De plus, *Picea* et *Pinus* sont implantés à cette époque.

La Période Moderne est quant à elle caractérisée par la Révolution Industrielle qui engendre une modification de l'utilisation des forêts car le bois est maintenant remplacé par le charbon et la houille (ETIENNE, 2011). La gestion forestière impose alors un allongement des rotations et une exploitation en futaies, qui engendrent une augmentation des pourcentages polliniques des arbres (ETIENNE *et al.*, 2013).

Dans les Vosges cristallines, dans les sites du Hury et du Champ du Feu, d'importantes activités minières liées à l'extraction du fer entre 1500 et 1600 cal. AD (450-350 cal. BP) engendrent une forte régression du hêtre qui est l'essence principalement utilisée dans la production de charbon de bois dans les Vosges (MARIET, 2016 ; MARIET *et al.*, 2016). Le milieu reste cependant boisé et la présence de marqueurs polliniques d'agriculture atteste d'une double utilisation du paysage dans les vallées. Le site du Champ du Feu enregistre ensuite une phase caractérisée par le retour du hêtre et un déclin des activités agricoles probablement en lien avec les combats de la Guerre de Trente ans (1618-1648) (MARIET, 2016). La période comprise entre 1600 et 1850 cal. AD (350-100 cal. BP) est marquée par une intensification des ouvertures contemporaine de l'augmentation des indices polliniques d'agriculture qui indique que les activités minières sont remplacées par des activités agropastorales (MARIET, 2016 ; MARIET *et al.*, 2016). À cette époque, les industries textiles se développent également dans les vallées. Dans la séquence de la tourbière du Champ du Feu, la pression anthropique continue d'augmenter à la période suivante (1850-1950 cal. AD, 100-0 cal. BP) avec d'une part, la plantation de pins et d'épicéas pour la production de bois de construction et d'autre part, l'expansion du pastoralisme à haute altitude (augmentation des taxons rudéraux) et le développement de l'industrie textile dans la vallée (MARIET, 2016). De 1950 cal. AD à nos jours, les deux sites enregistrent le retour d'un dense couvert forestier et une forte diminution de la pression anthropique et notamment des indices d'agriculture (MARIET, 2016 ; MARIET *et al.*, 2016). Un changement de pratique est donc visible pour le dernier siècle au cours duquel l'agriculture est réduite et remplacée par l'exploitation forestière.

Outre les analyses polliniques, des études de sols forestiers dans le Massif des Vosges et sur le Plateau Lorrain ont mis en évidence que l'utilisation des déboisements pour la culture des

céréales, notamment à la période romaine, impactent encore de nos jours les caractéristiques du sol, malgré la recolonisation forestière (DUPOUEY *et al.*, 2002 ; ETIENNE, 2011 ; KOERNER *et al.*, 1997 ; MARIET, 2016). Ces études montrent donc un important impact anthropique passé sur les paysages des régions voisines du PNR des Vosges du Nord et un héritage historique important dans ces régions.

2.2. Les Vosges du Nord

Dans les Vosges du Nord, à savoir les Basses Vosges gréseuses, partie la plus septentrionale du Massif des Vosges et zone d'étude de cette thèse, les analyses polliniques sont très rares et seules cinq séquences ont été étudiées à la fin des années 1930 (Figure 2-1, DUBOIS *et al.*, 1938 ; HATT, 1937). Le travail de HATT (1937) porte sur l'étude de 39 tourbières réparties du nord au sud du Massif des Vosges ainsi que de la Plaine d'Alsace au Plateau Lorrain et parmi elles, quatre séquences ont été prélevées dans le Pays de Bitche autour de Neudoerfel (commune de Dambach), dans le camp militaire de Bitche, au sud de la ville de Bitche ainsi qu'à Baerenthal. À celles-ci s'ajoutent une autre séquence prélevée dans la tourbière de l'Erlenmoos (Pays de Bitche) et étudiée par DUBOIS *et al.* (1938).

Dans les cinq sites, l'évolution des principales essences forestières est assez similaire à celle observée dans les Hautes Vosges (DUBOIS, 1939 ; HATT, 1937). Quatre des cinq séquences débutent ainsi par une phase à bouleau seul ou dominant le pin, suivi par une phase à pin. Par la suite le noisetier, puis la chênaie diversifiée et enfin le hêtre se succèdent mais les différentes phases sont peu nettes, voire parfois absentes, car elles s'estompent face aux forts pourcentages des pollens d'aulne et de bouleau. Le pin présente également des valeurs élevées tout au long de certaines séquences, rendant peu visible le développement des nouvelles essences. *Abies* et *Picea* sont présents dans les séquences mais restent rares. Des pollens d'épicéa sont ainsi identifiés avec des pourcentages polliniques de 1 à 3,5% au sommet des séquences (HATT, 1937).

Ces séquences offrent donc un aperçu de l'histoire forestière des Vosges du Nord mais l'absence de datation ne permet pas de calage chronologique et le faible pas d'échantillonnage, avec un échantillon tous les 25 à 50 cm, met en évidence uniquement les grandes tendances suivies par les essences forestières.

Ainsi, les interactions homme-milieu n'ont jamais été étudiées par le biais d'analyses paléoenvironnementales dans les Vosges du Nord, où les diagrammes disponibles ne présentent que les courbes des principaux taxons arboréens. En revanche, les données historiques et géohistoriques récentes, l'étude des archives ainsi que les découvertes archéologiques, même fragmentaires, montrent une présence humaine ancienne et une interaction homme-milieu importante (JEHIN, 2005 ; ROCHEL, 2017 ; SCHMIT *et al.*, 2017). Ces interactions sont particulièrement bien connues pour les périodes récentes et notamment à partir du XVII^{ème} siècle avec le développement des activités industrielles (métallurgie et verrerie). L'étude des archives souligne alors le rôle particulier des forêts dans la vie des populations depuis le Moyen Âge (JEHIN, 2005 ; ROCHEL, 2017).

Ainsi, au vu du fort potentiel d'interactions entre les populations et leur environnement dans la région et des nombreuses différences qui distinguent les Basses Vosges gréseuses des Hautes Vosges (géographie, géologie, histoire, végétation...), il apparaît intéressant de mener de nouvelles études dans cette région où les premières analyses polliniques soulignent déjà quelques différences dans l'histoire de la végétation forestière.

3. Objectifs de l'étude

Dans ce contexte, cette thèse s'articule donc autour de quatre grands objectifs :

- Reconstituer l'histoire de la végétation au cours de l'Holocène afin de combler une lacune géographique dans les connaissances de la mise en place des formations végétales dans le nord-est de la France. Cette histoire sur le long terme permettra de reconstituer les grandes variations d'origine naturelle afin d'identifier parmi les modifications de la végétation celles d'origine anthropique.
- Reconstituer l'histoire des interactions homme-paysage-climat en identifiant les différentes activités humaines et en repérant leurs impacts sur le paysage.
- Appréhender la résilience des écosystèmes et comprendre la construction des paysages actuels, afin d'aider à la mise en place d'actions de gestion, de restauration et de conservation des milieux.
- Participer à combler la lacune concernant l'histoire de l'occupation humaine des Vosges du Nord et principalement du Pays de Bitche (partie mosellane des Vosges)

du Nord), essentiellement pour les périodes antérieures au Moyen Âge pour lesquelles les données archéologiques sont fragmentaires (SCHMIT *et al.*, 2017).

Pour répondre à ces objectifs, une approche multi-proxy est menée sur quatre séquences prélevées dans quatre zones tourbeuses des Vosges du Nord et plus particulièrement localisées dans le Pays de Bitche. L'identification et le comptage des microfossiles polliniques et non-polliniques, le comptage des particules carbonisées microscopiques, ainsi que la caractérisation des sédiments et la géochimie ont été utilisées pour reconstituer l'histoire de l'environnement et des interactions homme-milieu-climat à une échelle locale et « micro-régionale » autour des zones humides.

Chapitre I.

Présentation du cadre d'étude



E.Gouriveau

Paysage des Vosges du Nord vu du haut de la tour panoramique du Grand Wintersberg

I.1. Les Vosges du Nord

Les Vosges du Nord constituent la limite orientale du Bassin Parisien et la partie la plus septentrionale du massif des Vosges, au nord-est de la France. Elles s'étendent depuis la ville de Saverne, au sud, jusqu'à la frontière allemande, au nord, et du plateau lorrain, à l'ouest, à la plaine d'Alsace, à l'est (Figure 1-1). L'ensemble du massif des Vosges du Nord est inclus dans le Parc Naturel Régional des Vosges du Nord (PNR, créé en 1975), devenu Réserve de Biosphère de l'UNESCO en 1989.

Du point de vue administratif, les Vosges du Nord sont situées à cheval sur le Bas-Rhin (Alsace, 67) et la Moselle (Lorraine, 57). La partie mosellane du massif, appelée le Pays de Bitche ou *Bitscherland*, se compose de deux entités géographiques et paysagères (Figure I.1-1):

- le pays découvert ou Imgau, à l'ouest. Il est caractérisé par des sols riches, permettant une agriculture étendue dont résulte un milieu largement ouvert.
- le pays couvert ou Wasgau, à l'est. À l'inverse de l'Imgau, ses sols pauvres et son relief en font une région principalement forestière.

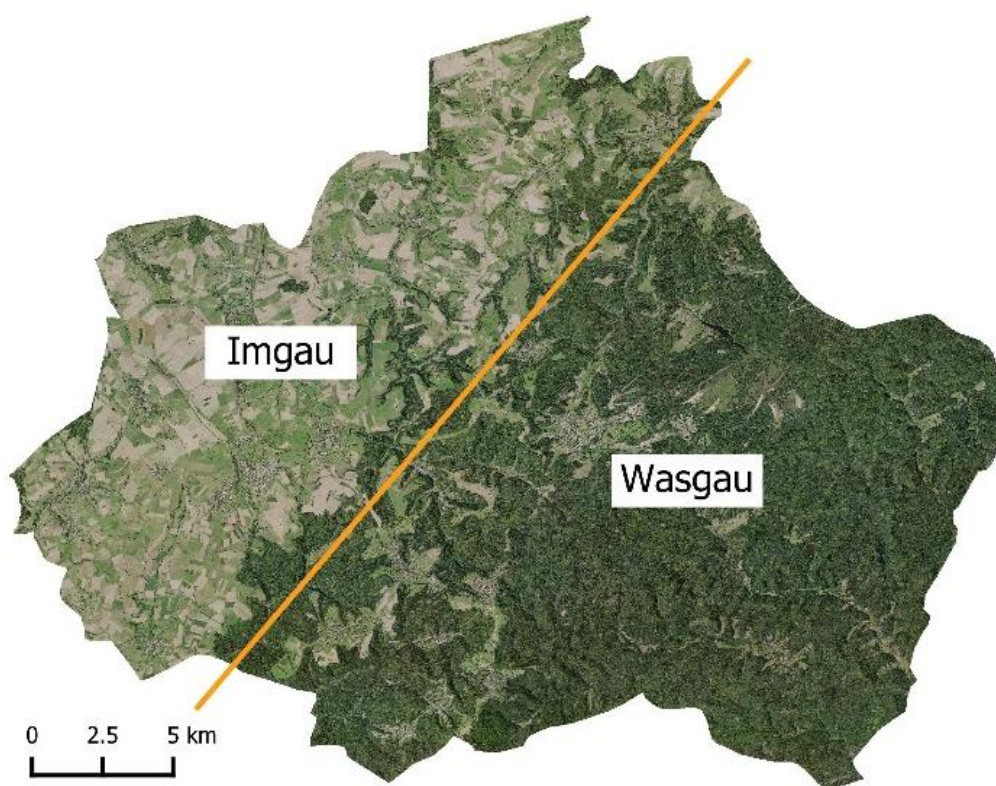


Figure I.1-1 : Division du Pays de Bitche en Imgau (pays découvert) et Wasgau (pays couvert)
(auteur : E.Gouriveau, source : BD ORTHO ©IGN)

I.1.1. Géographie

Les Vosges sont un massif de moyenne montagne présentant un relief dissymétrique (SELL *et al.*, 1998). Le côté alsacien se caractérise par des pentes abruptes vers le fossé rhénan, alors que le massif descend en pente douce jusqu'au plateau lorrain. Par ailleurs, il existe une très nette différence d'altitude nord-sud (Figure I.1-2.A). Les Vosges du Nord, inclinées vers le nord-est, possèdent une altitude moyenne autour de 400 m avec le Grand Wintersberg (581 m) et le petit Wintersberg (573 m) comme principaux sommets, alors que les Vosges du sud culminent à 1424 m d'altitude au Grand Ballon.

Les Vosges du Nord sont constituées d'un système de collines au sommet arrondi, de plateaux entaillés de vallées étroites et de larges vallées évasées à pentes faibles, souvent à fond tourbeux, que l'on nomme les « cuvettes » du Pays de Bitche (« cuvette » de Bitche ou de Neunhoffen dans le Pays de Bitche) (ENGEL & KAPP, 1959 ; MULLER & GENOT, 1991 ; MULLER, 2012). Trois types de relief principaux sont ainsi identifiés (DALBAVIE, 1999 ; MULLER & GENOT, 1991):

- des falaises à éboulis au Sud-Ouest, à la transition avec les calcaires du Muschelkalk (Figure I.1-2.B),
- des montagnes aux sommets arrondis au centre de la région (Figure I.1-2.C),
- de larges « cuvettes » dans le Pays de Bitche, comprenant quelques pitons rocheux (Figure I.1-2.D).

La région de Bitche-Neunhoffen abrite deux « cuvette » (Figure I.1-2.E), celle de Bitche (~50 km²) et celle de Neunhoffen (~100 km²) dont les fonds se situent entre 250 et 300 m d'altitude, c'est-à-dire environ 150 m plus bas que le plateau lorrain (MULLER, 1986 ; MULLER & GENOT, 1991). Ces « cuvettes » sont parsemées de collines de faibles altitudes (350 m en moyenne), orientées SO-NE, surmontées de rochers gréseux et découpées par des vallées et vallons à faibles pentes.

Tous les sites de la Réserve Naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche sont localisés dans la « cuvette » de Neunhoffen.

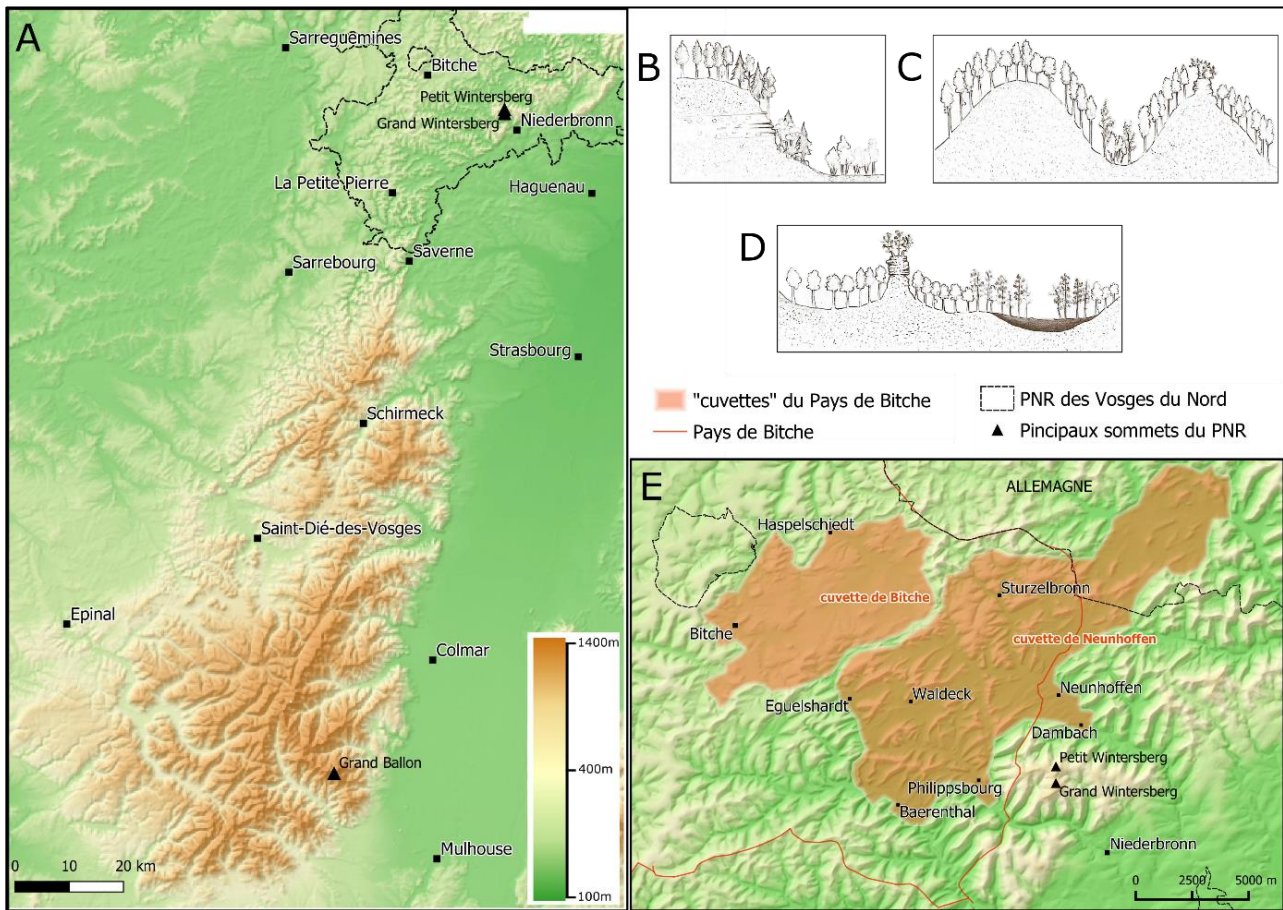


Figure I.1-2 : Le relief du massif des Vosges (A), les trois types de reliefs des Vosges du Nord (B, C, D) (DALBAVIE, 1999) et localisation des « cuvettes » du Pays de Bitche (E) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN)

I.1.2. Géologie

Les paysages des Vosges du Nord sont caractérisés par la présence de nombreux rochers gréseux (ou barres rocheuses ruiniformes, Figure I.1-3) issus d'importants phénomènes d'érosion dus à la remontée du massif vosgien au cours du Cénozoïque, en réponse à la collision alpine (SELL *et al.*, 1998).

Les grès font partie de la couverture sédimentaire mésozoïque qui s'est déposée sur le socle hercynien des Vosges. Lors de la structuration du fossé rhénan, elle a subi une érosion qui a été bien plus efficace dans les Vosges du Sud et du Centre que dans les Vosges du Nord où elle a été en partie conservée (SKRZYPEK & CRUZ MERMÉY, 2007).



Figure I.1-3: Rocher gréseux du château de Waldeck (Moselle)
(cliché : E.Gouriveau)

Ces grès, qui constituent le soubassement des Vosges du Nord, en sont une des caractéristiques principales et les différencient des Vosges Cristallines (du sud) où affleurent principalement des granites. C'est pourquoi les Vosges du Nord sont également appelées Basses-Vosges gréseuses par opposition aux Vosges Cristallines mais également aux Hautes-Vosges gréseuses qui s'étendent au sud de Saverne (Figure I.1-4.A).

Les grès roses des Vosges (environ 450 m d'épaisseur), se sont déposés au cours du Buntsandstein (Trias inférieur) (MENILLET *et al.*, 2015). La série du Buntsandstein (Figure I.1-4.B) est présentée ci-dessous (BLANALT *et al.*, 1967 ; MENILLET *et al.*, 2015 ; SKRZYPEK & CRUZ MERMU, 2007) :

- Le Grès d'Annweiler (Buntsandstein inférieur/Permien) est constitué de grès grossiers à tendance conglomératique.
- Le Grès vosgien (t1b-c, Buntsandstein moyen) constitue la plus importante formation de la série. Ce sont des grès feldspathiques durs, de couleur brun rouge clair à ciment siliceux rouge, contenant quelques minces niveaux argileux. Il repose sur une couche riche en galets, appelée conglomérat inférieur. Il est ensuite divisé en deux couches : le Grès vosgien inférieur (t1b), à stratification fortement oblique, avec des galets abondants et des nodules d'oxydes de manganèse ; le Grès vosgien supérieur (t1c), à

stratification horizontale, parfois légèrement oblique, d'où sont absents les galets et les nodules d'oxyde de manganèse.

Le Grès vosgien peut également être divisé en 3 couches, à savoir : couches de Karlstal, de Rehberg (grès à passées conglomératiques, à alternance de bancs à stratification oblique et de bancs à stratification horizontale) et de Trifels (grès plus ou moins conglomératique, sableux à la base, renfermant dans la partie inférieure de la couche des galets de quartz et quartzite).

- Le Conglomérat principal (t2P, Buntsandstein moyen/supérieur) contient des galets de quartzite rose et de quartz bien roulés, dans une matrice gréseuse très semblable au Grès vosgien.
- Les Couches intermédiaires (t2a, Buntsandstein supérieur) sont constituées de grès grossiers à nodules d'oxyde de fer et de manganèse, de passées argileuses et de quelques rares passées conglomératiques.

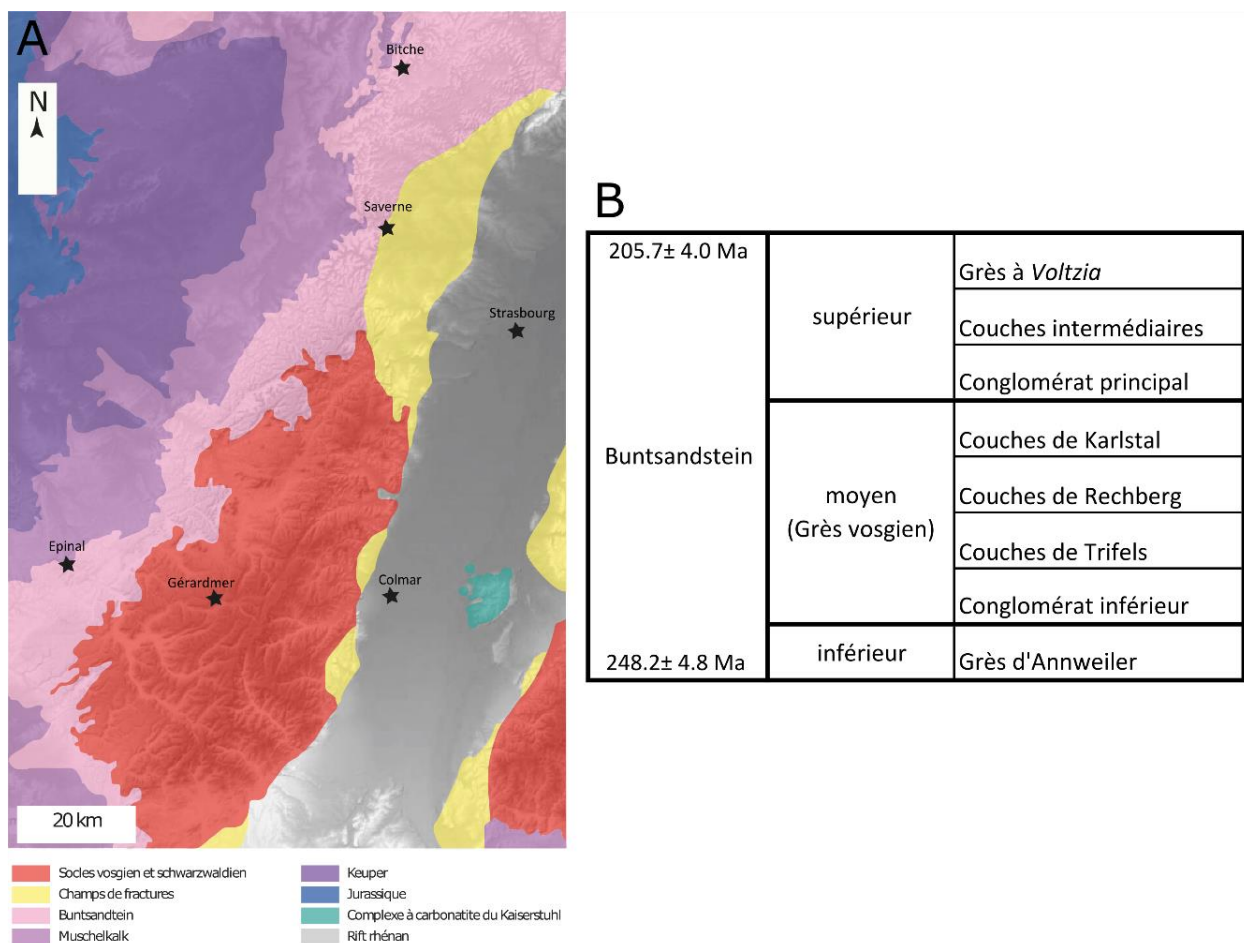


Figure I.1-4 : Carte géologique simplifiée des Vosges (d'après BEGEOT *et al.* 2019) (A) et résumé de la série du Buntsandstein (B)

- Le Grès à *Voltzia* (t2b, Buntsandstein supérieur) est divisé en deux couches : le grès argileux, constitué d'une alternance de bancs de grès micacés et de lits d'argile et le grès à meules, comportant de minces lits argilo-micacés.

Ces grès sont issus de la décantation de sables, limons et argiles, dans un environnement fluvio-deltaïque qui prévalait dans le nord-est de la France avant la transgression de la mer germanique à l'origine des dépôts marno-calcaires du Muschelkalk qui affleurent actuellement en limite occidentale des Vosges du Nord (à l'ouest de la ville de Bitche), dans la partie découverte du Pays de Bitche (Figure I.1-5, SKRZYPEK & CRUZ MERMU, 2007). De manière générale, les grès du Buntsandstein sont principalement composés de grains de quartz (SiO_2) et de grains de feldspaths potassiques (KAlSi_3O_8) altérés (MENILLET *et al.*, 2015). La fraction argileuse est peu importante et constituée principalement d'illite.

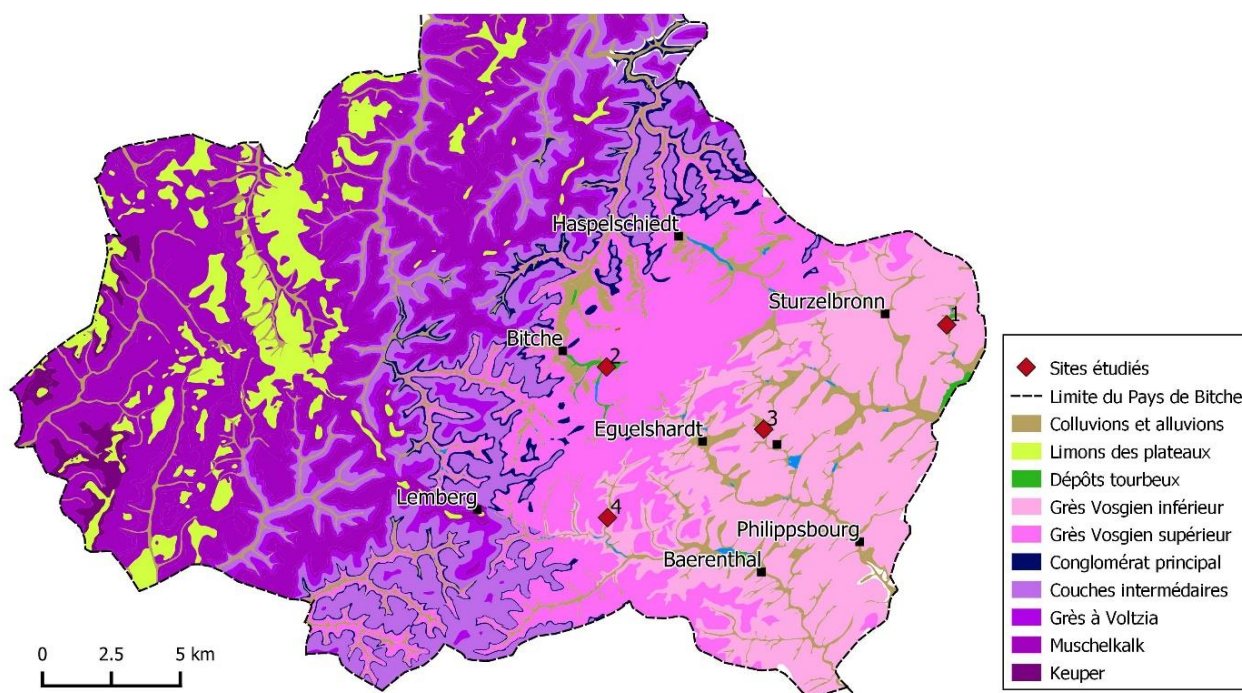


Figure I.1-5 : Carte géologique du Pays de Bitche, 1 : Tourbière de Kobert-Haut, 2 : Tourbière de la Horn, 3 : Tourbière de Waldeck, 4 : Tourbière de Bitscherthal (auteur : E.Gouriveau, source : Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004)

Les grès sont des roches acides, pauvres en éléments ferromagnésiens, en cations basiques et en argiles. Leur altération donne donc des sols sableux, acides et à capacité trophique basse. De plus, la nature sableuse et la faible teneur en argile de ces sols en font des sols filtrants avec des réserves en eau limitées. Ces sols sont alors soumis à la podzolisation, un processus

pédogénétique très fréquent sur le grès et qui consiste en un appauvrissement en matières organiques et en éléments minéraux des horizons superficiels du sol et provoque une diminution de sa fertilité. L'humus est de type mor¹ ou moder². En bas de pente et au fond des vallons, l'accumulation du sable et des argiles provenant des pentes est à l'origine de sols plus épais. Dans les Vosges du Nord, les versants exposés au nord supportent des sols bruns acides ou bruns ocreux, moins affectés par la podzolisation car plus humides et plus frais que les versants exposés au sud dont les sols sont extrêmement secs (DUCHAMP, 2004 ; SELL *et al.*, 1998). Dans les fonds de vallée et sur les faibles pentes, on trouve des sols hydromorphes et de la tourbe.

I.1.3. Hydrologie

Les grès du Trias inférieur renferment, grâce à leur caractère perméable, un aquifère important qui fournit une eau douce et pure, largement utilisée pour l'alimentation en eau potable (BLANALT *et al.*, 1967 ; SELL *et al.*, 1998). L'eau des ruisseaux et des rivières est, tout comme le sol, légèrement acide (pH généralement autour de 6-6,5), peu minéralisée et oligotrophe (MULLER, 2012).

Le réseau hydrographique des Vosges du Nord est dense et à débit régulier. Les cours d'eau principaux serpentent le plus souvent au centre d'un lit marécageux, au fond des vallées à fond plat et aux pentes raides, alors que les cours secondaires circulent dans des vallées perpendiculaires plus étroites en V (SELL *et al.*, 1998).

Les Vosges du Nord sont traversées du nord au sud par la ligne de partage des eaux entre le plateau lorrain (la Horn, la Schwalb, l'Eichel) et le Rhin dans la plaine d'Alsace (la Zinsel du sud, la Moder et ses affluents : le Rothbach, la Zinsel du nord, le Falkensteinbach, le Schwarzbach). Les « cuvettes » du Pays de Bitche sont bien drainées par un réseau dense de petits cours d'eau appartenant, pour la « cuvette » de Bitche, au bassin versant de la Moselle (plateau lorrain) et pour la « cuvette » de Neunhoffen, à celui de la Moder qui se jette dans le Rhin (MULLER, 1986).

¹ Humus brun-rouge, brut, dont la matière organique est peu transformée, acide et sans lien avec les éléments minéraux.

² Humus brun, acide, issu d'une décomposition lente de la litière contenant de la matière organique incomplètement décomposée.

I.1.4. Climat

Dans les Vosges du Nord, la température moyenne annuelle est d'environ 8,7°C et la moyenne annuelle des précipitations est comprise entre 800 et plus de 1000 mm (MULLER, 2012). Le climat y est donc de type subatlantique ou « océanique dégradé » (DUCHAMP, 2009). Mais, dans le Pays de Bitche, et plus encore dans les « cuvettes », le climat a une tendance continentale. Il y fait souvent plus froid et les précipitations y sont plus abondantes que sur le plateau lorrain ou dans la plaine d'Alsace, ce qui lui a valu le surnom de « Petite Sibérie ». La station de Mouterhouse (270 m d'alt.), dans le Pays de Bitche a ainsi enregistré entre 1971 et 2000, une température minimale annuelle moyenne de 3,6°C et une température maximale annuelle moyenne de 14,3°C, ainsi qu'une moyenne de précipitation d'environ 967,1 mm/an (Météo France). Les gelées peuvent être tardives et sévir 10 mois sur 12.

Les « cuvettes », quant à elles, sont caractérisées par un climat qualifié de microclimat à affinité subcontinentale, car leur topographie retient les masses d'air plus froides et humides (BONNEL & THOLOZAN, 2007 ; MULLER, 1986). Malheureusement, il n'existe pas de station météorologique permanente dans les « cuvettes ». Une seule station a été installée dans la « cuvette » de Neunhoffen, à Eguelshardt (260 m d'alt.) et n'a fonctionné que de 1983 à 1985 (MULLER, 1986). La température minimale annuelle moyenne alors enregistrée était de -6,9°C en 1985, avec des précipitations annuelles de 771 mm, et un maximum de 1009 mm atteint en 1984. L'amplitude thermique entre l'été et l'hiver est très importante dans les « cuvettes ». À Eguelshardt, par exemple, une température minimale moyenne de -8,1°C en janvier et une température maximale moyenne de 24°C en juillet ont été enregistrées en 1985, soit une amplitude de 32,1°C. La même année, en janvier, la température est descendue jusqu'à la température extrême de -22,3°C.

I.1.5. Végétation actuelle

Le Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, d'une superficie de 133 000 ha, voit les 2/3 de son territoire recouvert par les forêts (63,6 % en 2006) (PNR VOSGES DU NORD, 2011). Les forêts sont composées à 44 % de feuillus, 25 % de résineux, 18 % de forêts mixtes (Figure I.1-6). Les espaces ouverts, constitués à 31,8 % de cultures et de 4,6 % de surfaces urbanisées se localisent sur les marges du PNR.

Cette abondance de forêts s'explique par la nature très pauvre des sols qui ne sont donc pas favorables à l'agriculture, contrairement, par exemple, aux sols développés sur les terrains calcaires du Muschelkalk dans le pays ouvert du Pays de Bitche, dont le taux de boisement est très réduit.

L'altitude des Vosges du Nord place la végétation de cette région de l'étage du collinéen à celui du montagnard inférieur (DUCHAMP, 2009). De plus, le climat, et surtout les températures minimales extrêmes, limitent la répartition des espèces subatlantiques (MULLER, 1986).

Occupation du sol - 2018

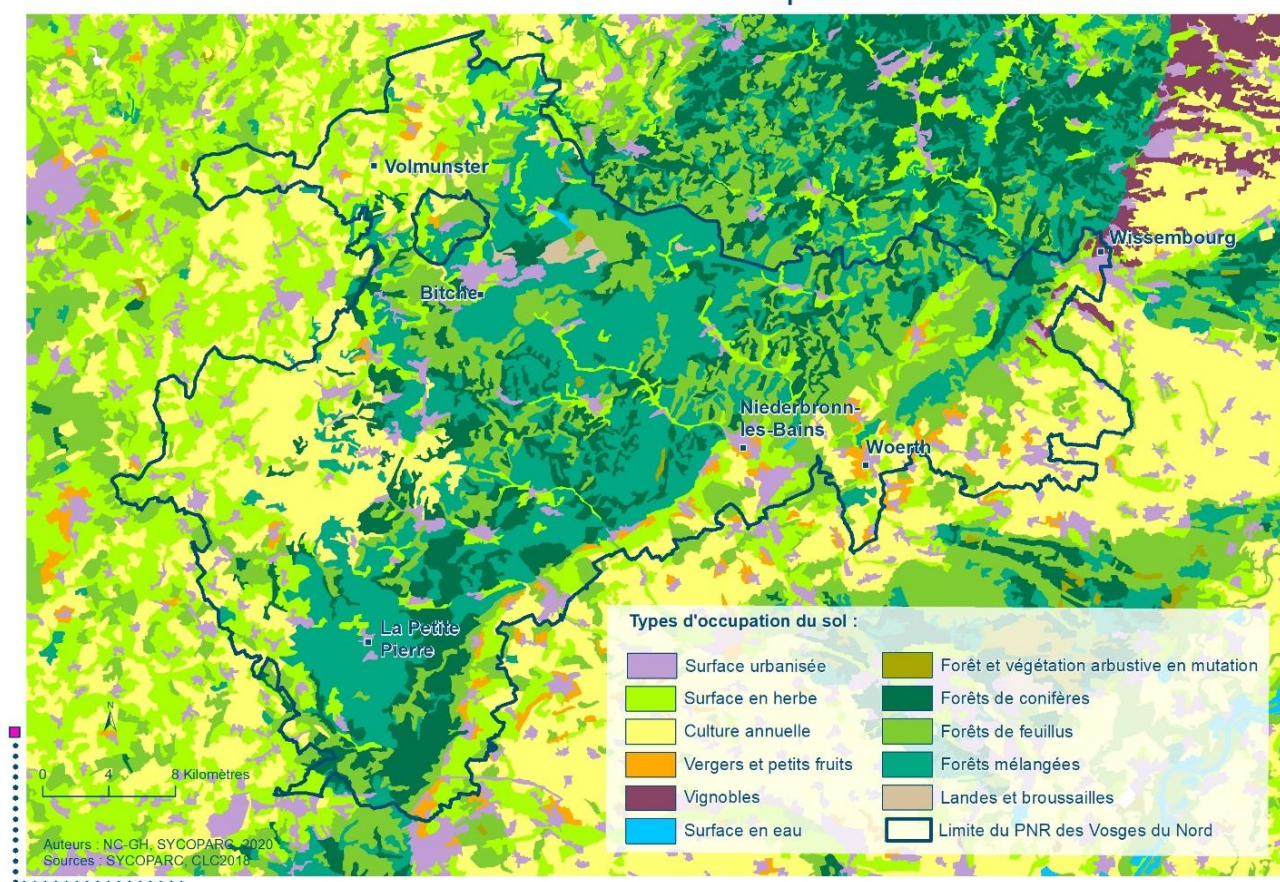


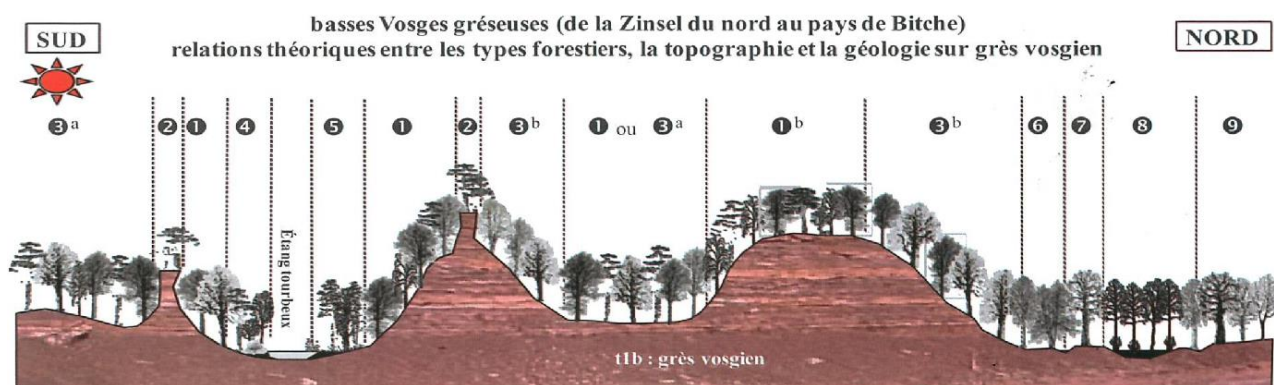
Figure I.1-6 : Carte d'occupation du sol du PNR des Vosges du Nord en 2018 (Auteurs : NC.GH, SYCOPARC, 2020, source : SYCOPARC, CLC 2018)

Dans la suite du texte, seuls les groupements forestiers présents dans le pays couvert du Pays de Bitche, où sont localisés les sites d'étude, seront présentés car ils représentent la grande majorité des formations végétales. Les groupements cités sont localisés sur la toposéquence des Basses Vosges gréseuses issue des travaux de BŒUF *et al.* (2014) (Figure I.1-7).

La formation forestière dominant sur les sols bruns des versants nord des collines gréseuses est la hêtraie-chênaie acidiphile de type *Luzulo luzuloidis-Fagetum sylvaticae* (MEUSEL, 1937)

(*Luzulo-Fagetum*, MULLER, 1986). En France, ce type forestier est limité aux régions du Nord-Est et est particulièrement présent dans les Vosges et les Vosges du Nord, où il s'étend de l'étage collinéen à l'étage montagnard supérieur (BOEUF *et al.*, 2014). Le *Luzulo-Fagetum* est un type méso-acidiphile à acidiphile qui se développe entre autres sur les grès et sur les colluvions de versant ou de bas de versant. Les espèces spontanées de cette formation sont le hêtre et le chêne sessile, avec lequel il se mélange souvent, ainsi que le bouleau verruqueux, le sorbier des oiseleurs, le sapin pectiné, le pin sylvestre et le tremble (BOEUF *et al.*, 2014). La strate bryologique est principalement composée de coussinets de *Polytrich* élégant. Les strates herbacées et arbustives sont quant à elles très réduites.

Sur les podzosols des sommets et des versants sud de ces collines, on trouve des hêtraies-chênaies de type *Leucobryo glauci-Fagetum sylvaticae* (PASSARGE & HOFMANN, 1968) (*Fago-Quercetum*, MULLER, 1986). Il s'agit d'un type forestier plutôt de plaine à collinéen, plus acidiphile que le *Luzulo-Fagetum* et plus subatlantique, mais présentant les mêmes essences spontanées, auxquelles s'ajoute le chêne pédonculé et *Leucobryum glaucum* dans la strate herbacée (BOEUF *et al.*, 2014).



- | | |
|---|--|
| ①- Chênaie acidiphile (<i>Betulo-Quercetum petraeae</i>) ; | ⑤- Pîneraie hygroacidiphile (<i>Sphagno capillifolii-Pinetum</i>) |
| ①b- variante thermophile | ⑥- Aulnaie rivulaire (<i>Carici remotae-Fraxinetum</i>) |
| ②- Pîneraie sur dalle (<i>Cladonio-Pinetum typicum</i>) | ⑦- Chênaie pédonculée (<i>Molinio-Quercetum</i>) |
| ③- Hêtraie-Chênaie : 3a - acidiphile (<i>Leucobryo-Fagetum</i>) ; | ⑧- Aulnaie mérécegeuse mésotrophe (<i>Carici elongatae-Alnetum</i>) ou tourbeuse oligotrophe (<i>Sphagno flexuosi-Alnetum</i>) |
| ③b- mésoacidiphile (<i>Luzulo-Fagetum</i>) | ⑨- Chênaie pédonculée-Charmaie acidiline hydrocline de bas versant (<i>Deschampsio cespitosae-Quercetum roboris</i>) |
| ④- Boulaies pubescentes tourbeuses hydro-minérotophiles (<i>Carici canescentis-Betuletum</i>) ou minéro-ombrotrophes (<i>Sphagno magellanici-Betuletum</i>) | |

Figure I.1-7 : Toposéquence de la végétation des Basses Vosges gréseuses (simplifiée d'après BOEUF *et al.*, 2014)

Des aulnaies (*Carici remotae-Fraxinetum*, *Carici elongatae-Alnetum*, *Sphagno flexuosi-Alnetum*) occupent le fond des gorges et des vallées étroites où des sources entretiennent un climat froid et humide (BOEUF *et al.*, 2014 ; MULLER, 1986). Des pineraies xérophiiles de type *Vaccinio myrtilli-Pinetum sylvestris* (JURASZEK, 1928) se développent également sur les sols pauvres et secs des rochers gréseux (MULLER & GENOT, 1991). Ce type forestier, en limite ouest de l'aire de répartition naturelle du pin sylvestre, est défini par des pineraies hyperacidiphiles et xéroclines, continentales, subcontinentales à subatlantiques qui s'étendent de la plaine jusqu'à l'étage montagnard (BOEUF *et al.*, 2014). Dans les Vosges gréseuses et dans les vallées du Pays de Bitche, ces forêts se développent fréquemment sur les Grès vosgiens et sur le Conglomérat. Les essences spontanées en sont, entre autres, le pin sylvestre, les chênes pédonculé et sessile, le bouleau verruqueux, le tremble, le sorbier des oiseleurs, parfois accompagné de la bourdaine, et l'alisier blanc (BOEUF *et al.*, 2014).

La végétation des « cuvettes » du Pays de Bitche a été étudiée en détail lors d'une thèse menée par Serge Muller (MULLER, 1986). La formation forestière dominante dans les « cuvettes » du Pays de Bitche, serait la chênaie acidiphile, dont la « physionomie a été façonnée par des siècles d'activité anthropique » (BOEUF *et al.*, 2014, p. 203). Deux types peuvent être identifiés en fonction de la sécheresse du sol, la chênaie de type *Hieracio glaucini-Quercetum petraeae* et la chênaie de type *Betulo pendulae-Quercetum petraeae*.

- La chênaie de type *Hieracio glaucini-Quercetum petraeae* (LOHMEYER, 1978) est présente sur des sols très secs (contreforts et promontoires siliceux). Ce type est xérocline à xéroacidiphile et s'étend de l'étage collinéen à submontagnard (BOEUF *et al.*, 2014). Les essences spontanées de cette formation sont l'alisier blanc, le charme, le chêne sessile, le pin sylvestre et le sapin. La strate herbacée est très dense et constituée de nombreuses poacées ainsi que de callune.
- La chênaie de type *Betulo pendulae-Quercetum petraeae* (SCHWICKERATH, 1933) (*Luzulo-Quercetum*, MULLER, 1986) se développe sur des sols plus favorables que le type précédent, de la plaine à l'étage collinéen (BOEUF *et al.*, 2014). Ce type forestier, acidiphile à très acidiphile, mésophile à mésohygroacidiphile se retrouve également en condition xérique sur les dalles rocheuses. Les essences spontanées sont le bouleau verruqueux, le charme, le tremble, les chênes pédonculé et sessile, le hêtre, le pin sylvestre et le

sorbier des oiseleurs. La strate herbacée est réduite, composée de molinie, de myrtille ou de fougère aigle.

Sur les versants nord des « cuvettes », on retrouve la hêtraie acidiphile de type *Luzulo luzuloidi-Fagetum sylvaticae* (MEUSEL, 1937), alors que sur les pitons rocheux de Grès vosgien, culminant entre 400 et 500 m dans le Pays de Bitche, on trouve encore des pineraies mais cette fois-ci de type *Cladino-Pinetum sylvestris typicum* (JURASZEK, 1928) (*Leucobryo-Pinetum cladonietosum*, MULLER, 1986). Ce type de pineraie, qualifiée de « rupestre », est hyperacidiphile et xérophile (BOEUF *et al.*, 2014). Les essences spontanées de cette formation forestière sont le pin sylvestre, les chênes sessile et pédonculé, le bouleau verruqueux, le tremble, le sorbier des oiseleurs et l'alisier blanc. La strate herbacée est importante, dominée par la callune. Les mousses et les lichens sont également très présents.

Sur les hydromors et sur les tourbes oligotrophes acides, les boulaies pubescentes tourbeuses hydro-minérotrophes de type *Carici canescentis-Betuletum* ou minéro-ombrotrophes de type *Sphagno magellanici-Betuletum* se développent aux côtés des pineraies hydroacidiphiles de types *Sphagno capillifolii-Pinetum*.

D'après MULLER (1986), l'étude de la végétation forestière des « cuvettes » du Pays de Bitche met en évidence la présence du pin sylvestre dans quelques stations extrêmes et fait de cette région un « maillon » dans la transition des chênaies atlantiques aux pineraies continentales.

I.1.6. Tourbières et étangs dans le Pays de Bitche

Une tourbière est définie comme « un milieu humide, colonisé par la végétation qui se développe sur un sol peu perméable, formé de tourbe, sur une épaisseur de 30-40 cm ou plus » (MANNEVILLE *et al.*, 2006). La tourbe est composée de matière organique (au moins 20-30 %), provenant de l'accumulation de restes végétaux dans un milieu où la présence quasi-permanente d'eau assure l'anaérobie. Les paramètres conditionnant la mise en place d'une zone tourbeuse sont multiples. Parmi eux, citons :

- le bilan hydrique (différence entre l'apport et la perte en eau) qui doit être équilibré ou légèrement positif,
- le climat qui doit présenter des températures fraîches et des précipitations suffisantes,
- le relief qui influe à la fois sur le bilan hydrique et sur les processus d'accumulation de la tourbe (pentes, creux...).

- le substrat rocheux qui est responsable de la perméabilité et conditionne également la végétation.

Les tourbières sont des systèmes complexes au cœur d'un important réseau d'interactions. Les facteurs écologiques entrant en compte dans l'apparition d'une tourbière sont multiples, et leur combinaison engendre autant de types de zones humides différents.

Les tourbières du Pays de Bitche sont des tourbières acides de basses altitudes. Le microclimat des « cuvettes » du Pays de Bitche, froid et humide, ainsi que l'affleurement de nappes phréatiques, permettent un bilan hydrique positif (BONNEL & THOLOZAN, 2007). De plus, les faibles pentes et le fond plat des « cuvettes » ont permis l'accumulation de la tourbe. Ainsi, dans le Pays de Bitche, des tourbières soligènes (liées à la présence de source, de suintements ou de ruissellement), topogènes (dues à la nappe phréatique affleurante dans une dépression topographique) ou limnogènes (formée par atterrissement dans un étang ou un lac) se sont mises en place (DUCHAMP, 2009 ; MANNEVILLE *et al.*, 2006).

Le type d'alimentation en eau de la tourbière permet de distinguer les tourbières minérotrophes et les tourbières ombrotrophes (MANNEVILLE *et al.*, 2006). On parle de tourbières minérotrophes lorsque celle-ci sont alimentées par l'eau du sol ou de l'aquifère. En revanche, les tourbières ombrotrophes ne sont alimentées que par l'eau atmosphérique (les précipitations). Les tourbières du Pays de Bitche sont essentiellement minérotrophes mais peuvent présenter des buttes de sphaignes (mousses composant principalement la tourbe) ombrotrophes. Dans cette région, on peut même parler de tourbières minérotrophes pauvres (PAYETTE & ROCHEFORT, 2001). En effet, les tourbières étant installées sur le Grès vosgien, l'eau des sources, des suintements et des ruissellements est acide et pauvre en nutriments, tout comme l'eau de pluie. Ainsi, sur ces tourbières plus oligotrophes (pauvre en nutriments) que les tourbières minérotrophes classiques (oligo-mésotrophe à mésotrophe), on observe une végétation en partie comparable à celle que l'on pourrait trouver sur les tourbières hautes, ombrotrophes.

L'origine des tourbières du Pays de Bitche n'a pas été clairement établie mais des analyses ont daté le démarrage de la turfigenèse de la tourbière du Grafenweiher (Figure I.1-8, n°16) aux environs de 6810 ± 60 BP (7764-7571 cal. BP), alors que la tourbière de l'Erlenmoos (Figure I.1-8, n°25) est plus ancienne et datée de 8500-9000 cal. BP (BONNEL & THOLOZAN, 2007 ; DALBAVIE, 1997 ; DUCHAMP *et al.*, 2007).

De nos jours, certaines tourbières du Pays de Bitche sont protégées au sein de la Réserve Naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche, créée en 1998 (Figure I.1-8). Beaucoup d'entre elles ont été modifiées par l'homme, soit par des drainages afin d'être cultivées ou d'y réaliser des plantations ; soit par création d'une retenue d'eau, après la mise en place d'une digue. Ces modifications ont de nombreuses conséquences sur les zones humides, comme le ralentissement ou l'arrêt de la turfigenèse, la minéralisation des couches superficielles de tourbe ou la destruction complète de la zone. Cependant, dans le cas de la création d'un étang, il arrive qu'une nouvelle zone tourbeuse se développe en bordure, comme c'est le cas en queue d'étang de Waldeck ou de Kobert-Haut.

Les étangs sont nombreux dans les Vosges du Nord, où ils ont été créés par l'homme. Il est cependant difficile de dater leur création. L'étude et la comparaison de différentes cartes anciennes (carte de Cassini (XVIII^{ème} siècle), Atlas topographique du Comté de Bitche (1758), carte de l'Etat major (1820-1866) permettent cependant d'obtenir quelques indices. Il semble que ces étangs aient été établis sur des fonds de vallon tourbeux préexistants. Beaucoup d'entre eux ont été créés au Moyen Âge (à partir du XII^{ème} siècle) à la suite de l'installation des abbayes en bordures et dans les forêts des Vosges du Nord. Les communautés religieuses cherchaient à valoriser les fonds de vallons tourbeux et les tourbières en y pratiquant la pisciculture. Certains étangs du Pays de Bitche auraient ainsi été créés par les moines cisterciens de l'abbaye de Sturzelbronn entre le XII^{ème} et le XVIII^{ème} siècle. En 1577, 28 étangs, utilisés pour l'élevage de truites, de carpes et d'écrevisses, sont recensés dans le Comté de Bitche (TRENDEL & BARABINOT, 1999).

Par la suite (XVII^{ème} siècle), des retenues ont été créées sur les cours d'eau afin que l'industrie du fer bénéficie de l'énergie hydraulique. Enfin, au XX^{ème} siècle, ce sont les particuliers qui détournent les ruisseaux ou édifient des barrages pour créer des étangs privés (DALBAVIE, 2005).

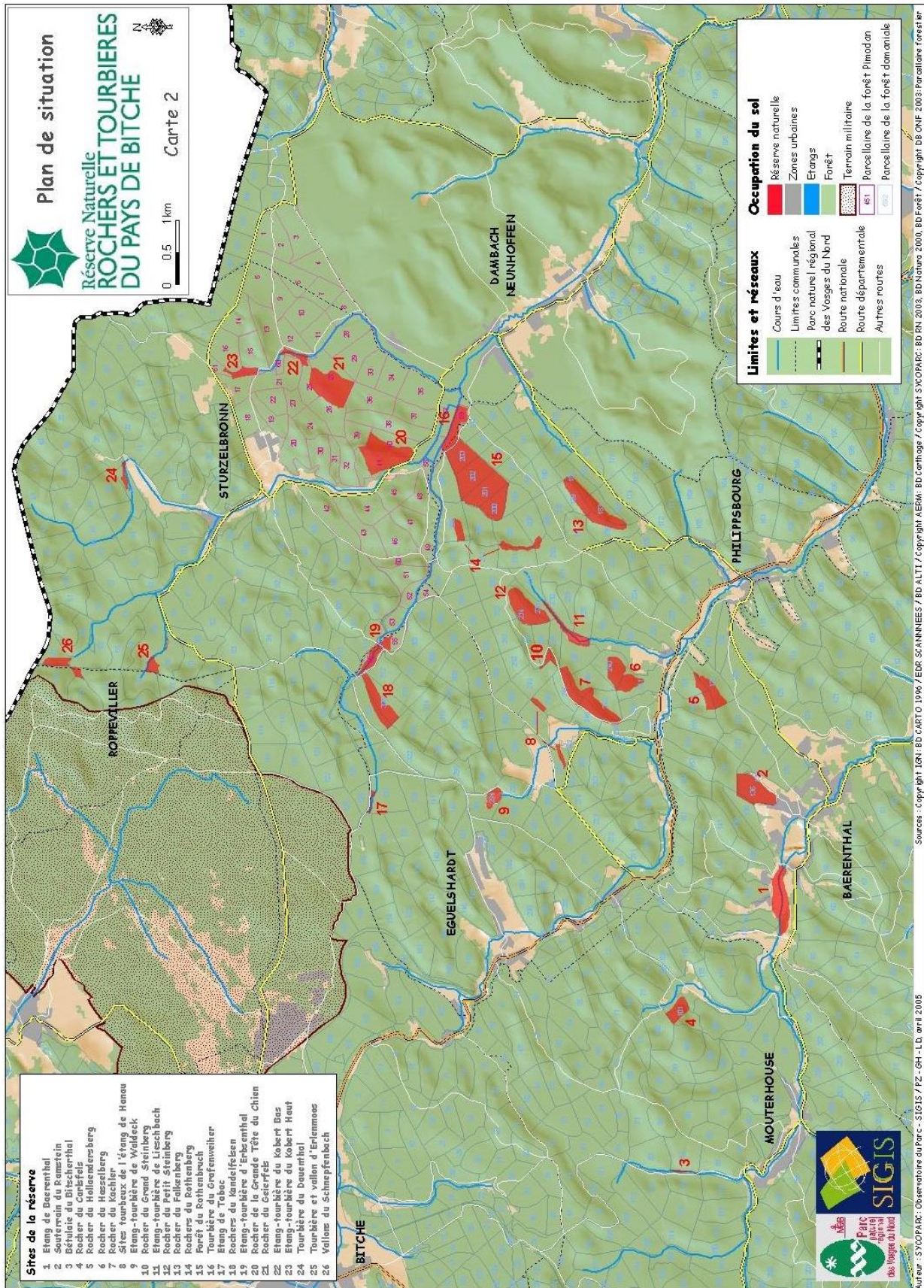


Figure I.1-8: Carte des sites de la Réserve Naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche (auteurs : SYCOPARC, PZ-GH-LD, source : SYCOPARC)

I.2. Contexte historique

I.2.1. Histoire des occupations humaines dans les Vosges du Nord

Cette partie a pour but de présenter les grandes lignes de l'histoire des Vosges du Nord et plus particulièrement de sa partie mosellane, le Pays de Bitche. Restituer l'histoire des Vosges du Nord n'est pas une tâche facile au vu de la nature de cette région, à savoir une entité géographique et géologique. À cheval entre plusieurs départements et plusieurs régions, son appartenance administrative a changé au cours de l'histoire et la région est devenue à plusieurs reprises zone de frontière (JEHIN, 2005). Frontière entre Royaume de France et Saint Empire Romain Germanique, entre France et Allemagne, entre Alsace et Lorraine, la région des Vosges du Nord a été une zone de tension qui a régulièrement subi des invasions et des guerres sur son territoire (Guerre de Trente ans, Guerre Franco-Prussienne, 1^{ère} et 2nd Guerre Mondiale). Les Vosges du Nord n'étant donc pas une entité historique et administrative, il est compliqué de reconstituer leur histoire plurielle. De plus, les découvertes archéologiques dans cette région sont pauvres, éparses, peu documentées et/ou très peu publiées.

Le Pays de Bitche est lui aussi un « pays d'entre-deux » (JACOPS *et al.*, 1990, p. 4), qui apparaît au cours du temps comme une terre stratégique, notamment pour les Ducs de Lorraine dans leur désir de conquête et d'expansion, mais contrairement aux Vosges du Nord, il apparaît comme une unité qui n'aurait jamais été divisée au cours du temps. De plus, bien que le Pays de Bitche soit une entité récente, sa délimitation actuelle se rapproche de celle de la Seigneurie ou du Comté de Bitche, datant du XI^{ème} siècle (RUDRAUF, 2008). Les connaissances historiques concernant le Pays de Bitche sont limitées pour les périodes anciennes du fait du manque d'archives. En effet, les nombreux conflits ayant eu lieu sur son territoire ont engendré d'importantes destructions nous privant de beaucoup de ces archives, témoignages du passé (OECKINGHAUS, 1917). De plus, très peu de fouilles archéologiques ont été menées dans le Pays de Bitche et les découvertes sont essentiellement des vestiges isolés, sortis de leur contexte, remontés à la surface des champs ou découverts lors de prospections. Malgré cela, les recherches des Sociétés d'Histoire et d'Archéologie (essentiellement la section du Pays de Bitche de la Société d'Histoire et d'Archéologie de Lorraine) et leurs publications donnent tout de même accès à des bribes du passé qui permettent de reconstituer l'histoire de la région. Cependant, les découvertes ne sont pas homogènes sur le territoire : plus abondantes dans le

pays découvert que dans le pays couvert du Pays de Bitche (SCHMIT, 2009). En effet, les recherches archéologiques dans cette zone sont rendues difficiles par le relief et le couvert forestier dense et les vestiges semblent de plus en plus bien conservés dans les sols acides.

I.2.1.1. Le Paléolithique : 801950-11550 cal. BP / 800000-9600 cal. BC

Les sites et les découvertes du Paléolithique sont rares dans les Vosges du Nord et dans le Pays de Bitche comme plus généralement en Lorraine et en Alsace (Figure I.2-1, Schmit 2005 ; Schnitzler 2006). Cette période est donc assez mal connue dans cette région.

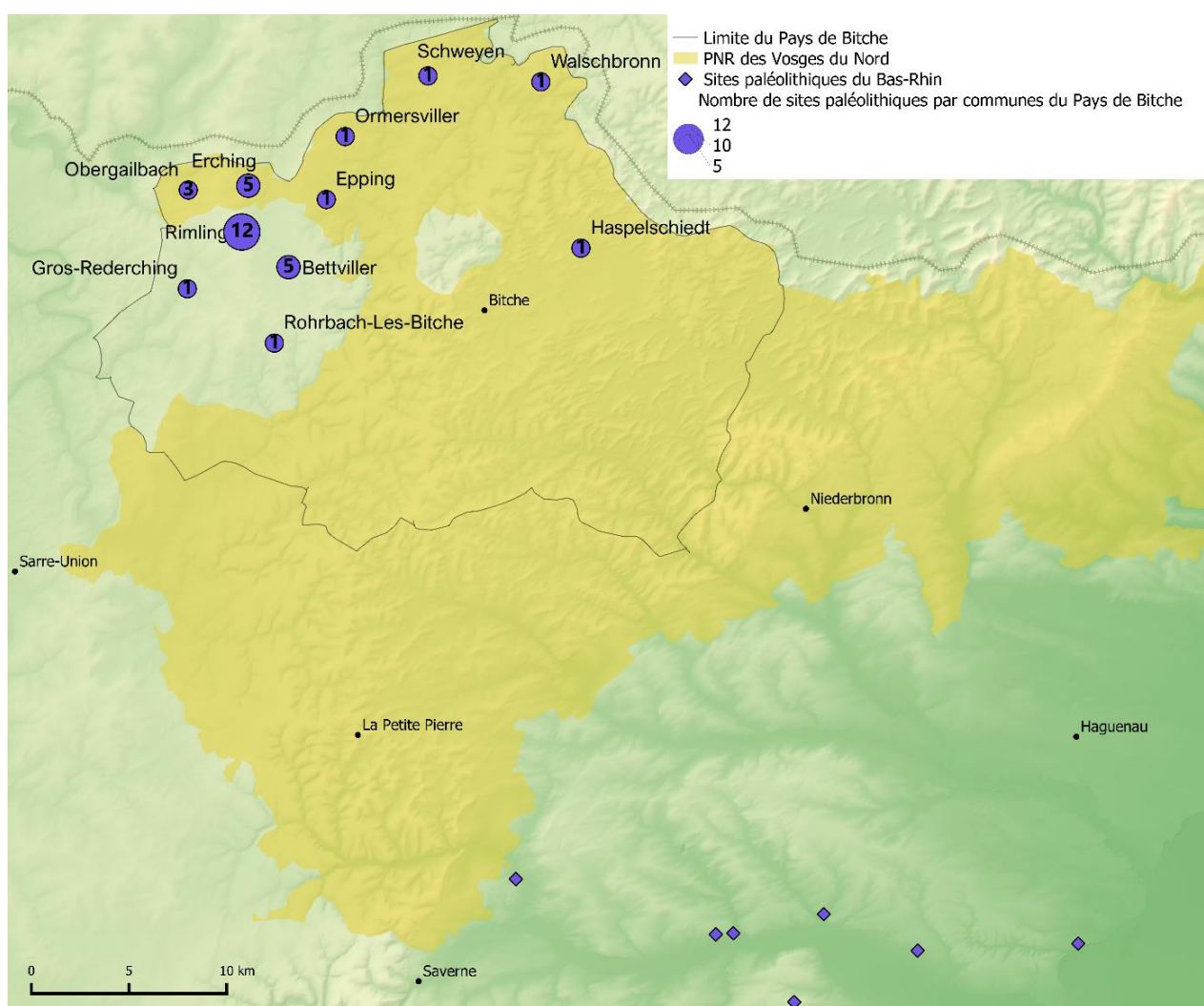


Figure I.2-1 : Localisation des découvertes du Paléolithique dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT et al., 2017) et le département du Bas-Rhin (d'après la Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN,)

Cependant, plusieurs outils taillés, dont les attributions chronologiques et culturelles restent délicates, ont été découverts essentiellement dans la région de Rimling et ses environs (Imgau, Figure I.2-1) : racloirs, galets aménagés, bifaces, pointe de la Font-Robert (Figure I.2-2) (SCHMIT *et al.*, 2017). Seuls 5 galets aménagés ont été découverts dans la partie couverte du Pays de Bitche, à Haspelschiedt (SCHMIT *et al.*, 2017).



Figure I.2-2: Pointe de la Font-Robert, Rimling (SCHMIT 2015, cliché : S. Schmit)

Ces découvertes attestent du passage de chasseurs-cueilleurs qui ont utilisé les ressources locales pour la confection de leurs outils : quartz et quartzite du Conglomérat Principal du Buntsandstein et silex du Muschelkalk. La disponibilité de ces matières premières ainsi que la proximité du plateau lorrain ont pu favoriser cette présence ancienne (SCHMIT, 2005). La présence de Néanderthal dans la partie découverte est attestée au Paléolithique moyen (SCHMIT, 2005).

I.2.1.2. Le Mésolithique : 11550-7450 cal. BP / 9600-5500 cal. BC

Le Mésolithique est une période assez bien représentée dans le Pays de Bitche : nucléus, éclats, lamelles, pointes triangulaires (Figure I.2-3, Schmit 2006). Les découvertes dans le pays couvert sont un peu plus abondantes qu'à la période précédente. Dans la continuité du Paléolithique, les groupes de chasseurs mésolithiques exploitent les matières premières locales. Deux occupations durables semblent avoir existé à cette époque sur les actuelles communes de Lemberg et de Walschbronn (Figure I.2-3) (SCHMIT *et al.*, 2017).

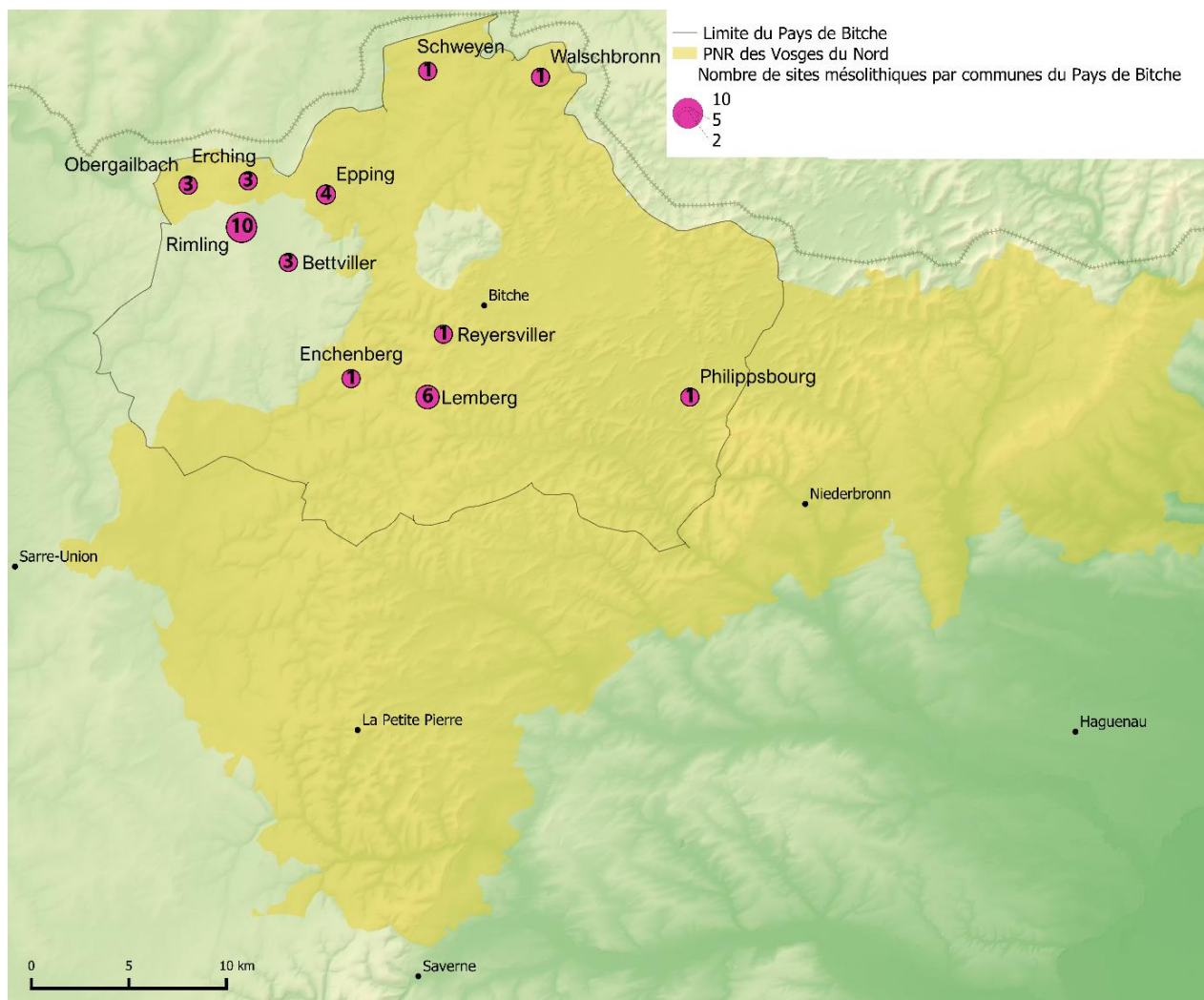


Figure I.2-3 : Localisation des découvertes du Mésolithique dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT *et al.*, 2017) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN,)

I.2.1.3. Le Néolithique : 7450-4150 cal. BP / 5500-2200 cal. BC

La Néolithisation des Vosges du Nord et du Pays de Bitche s'inscrit dans celle du nord-est de la France qui voit l'arrivée des colons danubiens de la culture rubanée vers 5300-5500 avant J.C. (BLOUET & LANSIVAL, 1993 ; SCHNITZLER, 2006).

Dans les Vosges du Nord, les vestiges les plus connus supposés de la période néolithique sont les très nombreux polissoirs, présents pour la plupart dans la partie couverte du Pays de Bitche autour principalement d'Eguelshardt, Baerenthal, Philippsbourg ou encore Sturzelbronn (SCHMIT, 2006 ; SCHMIT *et al.*, 2017). Cependant, ces polissoirs ne sont pas datés et ni leur origine, ni leur réelle fonctionnalité n'ont été démontrées. Le plus connu, le polissoir d'Haspelschiedt (Figure I.2-4) s'est malheureusement effondré en décembre 2019, sans n'avoir jamais été réellement étudié...



Figure I.2-4 : Polissoir d'Haspelschiedt (source : maisonsdesrochers-graufthal.fr)

Heureusement, il ne s'agit pas là des seuls vestiges documentant la période charnière du Néolithique dans le Pays de Bitche (Figure I.2-5), période au cours de laquelle l'agriculture et l'élevage deviennent les nouveaux moyens de subsistance.

De nombreux vestiges ont été découverts pour cette période, dont de nombreux outils (SCHMIT, 2006 ; SCHMIT *et al.*, 2017) :

- des herminettes, haches (Figure I.2-6) et haches-marteaux utilisés pour l'abattage des arbres et le travail du bois, mais aussi pour les activités de boucherie.
- des pointes de flèches (Figure I.2-6) étaient utilisées pour la pratique de la chasse.
- des faucilles et des meules, attestant de la culture de céréales et d'une pratique agricole ; la quasi-totalité de ce type de matériel a été retrouvée dans la partie découverte du Pays de Bitche et est absente de la partie couverte ; les populations néolithiques se sont donc préférentiellement installées dans la partie découverte où les sols sont plus riches et permettent la culture des céréales ; cette localisation sur les sols loessiques est d'ailleurs une des caractéristiques de la population rubanée (WHITTLE, 1985) ; à l'inverse, la partie couverte du Pays de Bitche constituée de grès ne fournit qu'un sol acide, pauvre en nutriments et à faible réserve en eau, très peu propice à l'agriculture.

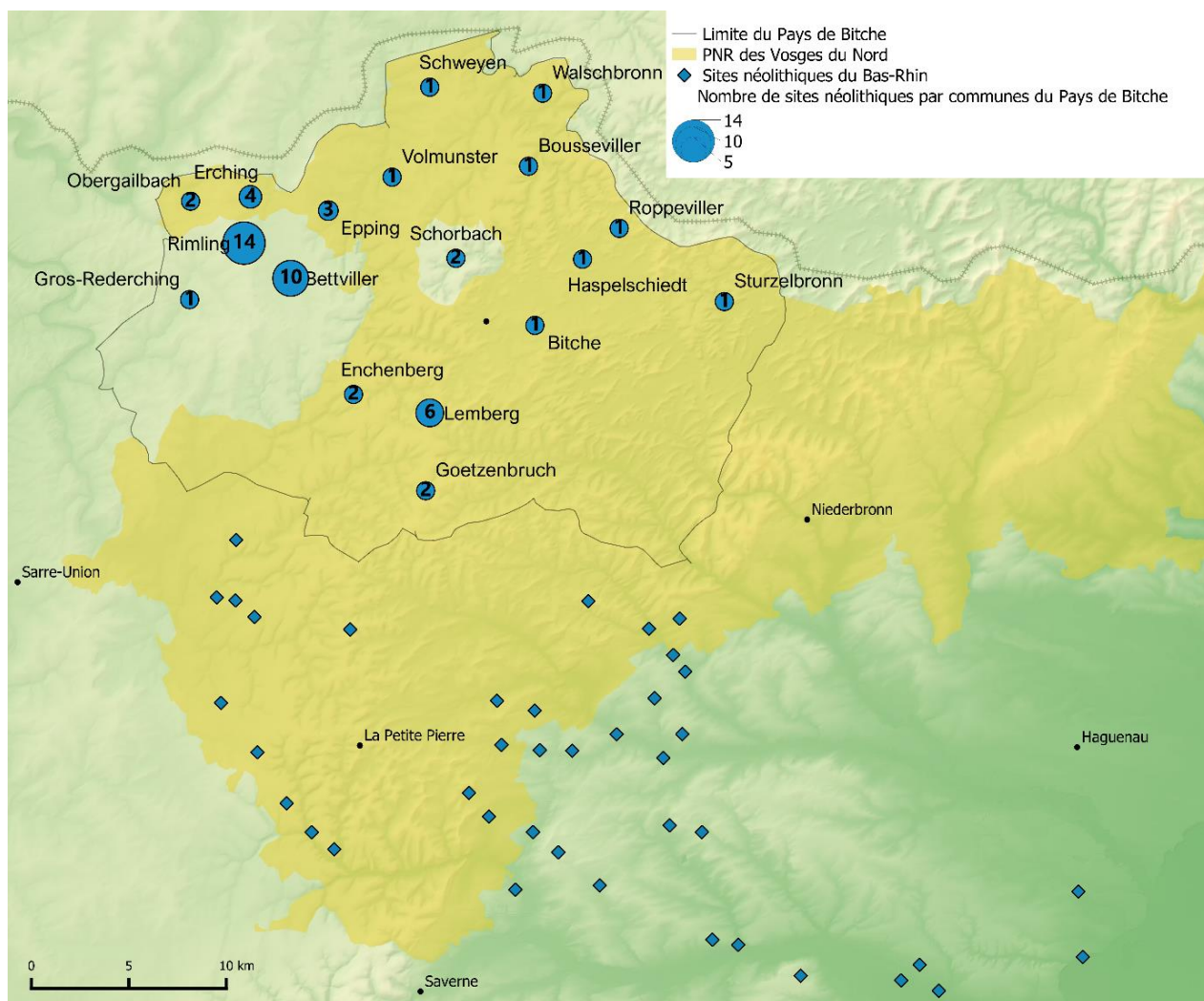


Figure I.2-5 : Localisation des découvertes du Néolithique dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT *et al.*, 2017) et le département du Bas-Rhin (d'après la Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTV2 ©IGN,)

Ces découvertes indiquent que la population de la région du Pays de Bitche a augmenté à partir du Néolithique moyen (SCHMIT, 2008 ; SCHMIT *et al.*, 2017). C'est également à partir de cette période que des fortifications sont construites dans les autres régions de l'Est de la France (Bourgogne, Jura, Lorraine) (SCHMIT, 2008).

Dans les Vosges du Nord, deux enceintes connues pendant la protohistoire pourraient avoir une origine néolithique. Il s'agit de la Burg de Ratzwiller (à 2 km au SO du Pays de Bitche) et le Ring d'Haspelschiedt, localisé dans le pays couvert. C'est la découverte de nombreuses haches néolithiques, dont quatre au Ring même et neuf dans les villages voisins qui laissent à penser à une potentielle origine néolithique (SCHMIT, 2008).



Figure I.2-6 : Haches polies et pointes de flèches découvertes au Pays de Bitche (SCHMIT *et al.*, 2017, cliché : S. Schmit)

I.2.1.4. La Protohistoire

Les découvertes de la Protohistoire sont moins abondantes que celles de la période précédente (Figure I.2-7). De plus, l'absence de datation précise empêche bien souvent l'attribution des vestiges à un âge des Métaux précis, à savoir, âge du Bronze ou âge du Fer.

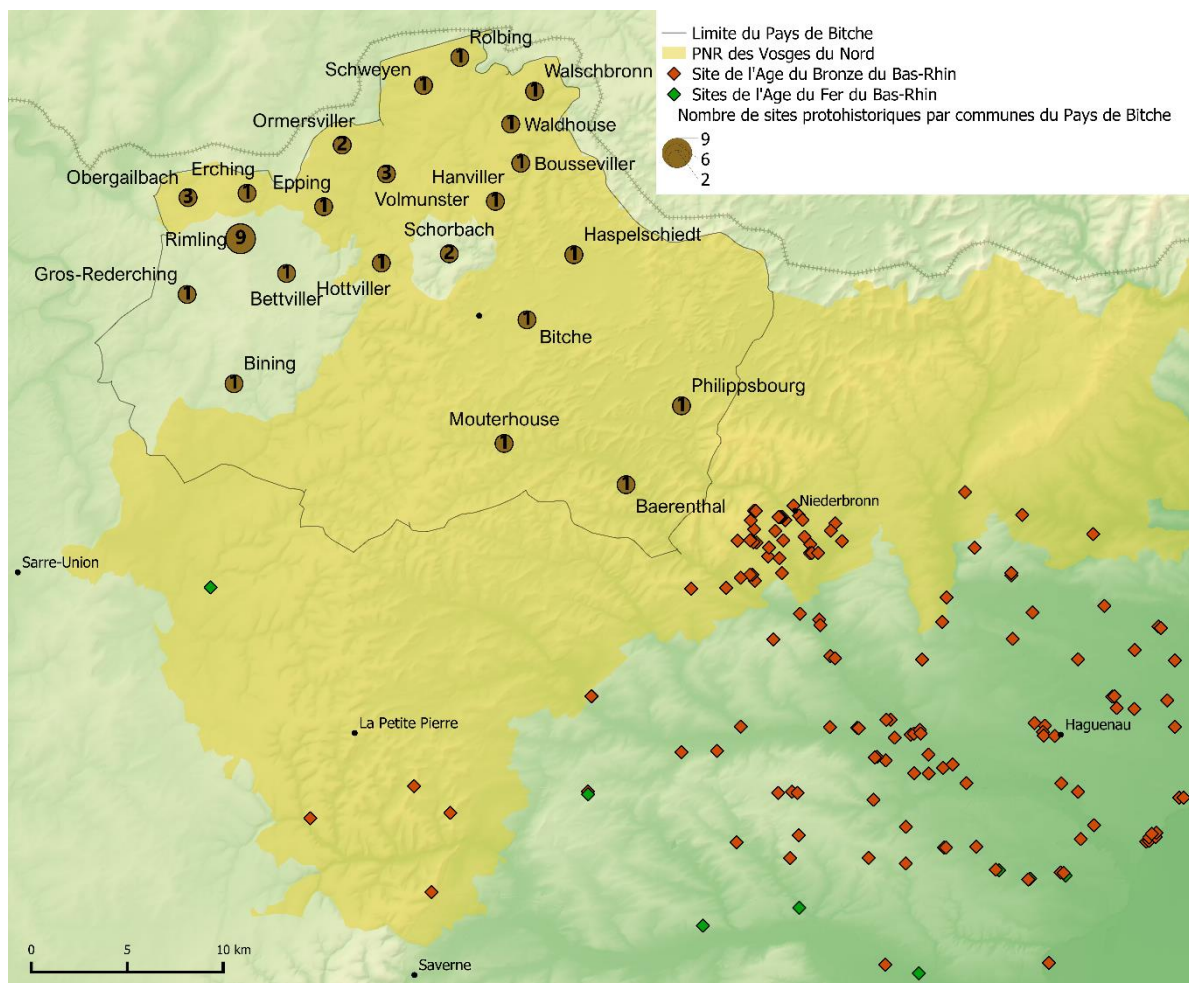


Figure I.2-7 : Localisation des découvertes de la Protohistoire dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT *et al.* 2017) et le département du Bas-Rhin (d'après la Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTV2 ©IGN.)

I.2.1.4.1. L'âge du Bronze : 4150-2750 cal. BP / 2200-800 cal. BC

Comme pour les époques précédentes, l'âge du Bronze est une période peu connue dans les Vosges du Nord, comme en Lorraine et en Alsace (DENAIRE & CROUTSCH, 2009 ; SCHMIT *et al.*, 2017). Les vestiges y sont rares et leur datation n'est pas précisément établie.

Les principaux témoins de cette époque dans le Pays de Bitche sont les tumuli (rarement clairement datés) et les objets en bronze (poignard en bronze de Bitche (Figure I.2-8), bracelets à Erching et à Rimling, couteau en bronze d'Obergailbach). C'est du Bronze final que date également le premier objet en verre retrouvé au Pays de Bitche, une perle en verre bleu à filet blanc (SCHMIT, 2015 ; SCHMIT *et al.*, 2017). Sur le versant alsacien des Vosges du Nord, une tombe à incinération, également datée du Bronze final (environ 1050 av.J.-C.), a été retrouvée à Reichshoffen.



Figure I.2-8 : Poignard en bronze, Bitche -" Rue Saint-Sébastien" (cliché : S. Schmit)

I.2.1.4.2. L'âge du Fer 2750-2000 cal. BP / 800-50 cal. BC

Dans le Pays de Bitche, l'âge du Fer est un peu mieux documenté que la période précédente (SCHMIT *et al.*, 2017). Les découvertes archéologiques de cet âge sont en effet plus nombreuses : meules et molettes, monnaies, armes, tumuli, perles de verre... À partir du deuxième âge du Fer, des agglomérations se forment et l'on sait, grâce au récit de Jules César que le Pays de Bitche fait partie de la cité des Médiomatriques (Figure I.2-9) qui s'étend de l'Argonne au Pays de Bitche, au Nord-Est de la Gaule (BLOUET & LANSIVAL, 1993 ; FLOTTE & FUCHS, 2004 ; MENGUS, 2011 ; SCHMIT, 2008).

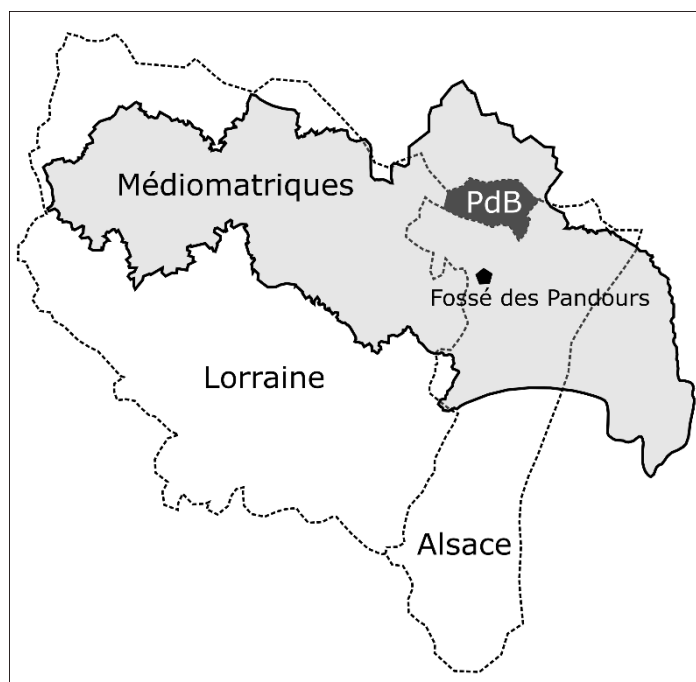


Figure I.2-9 : Carte de la Cité des Médiomatriques (simplifiée et modifiée d'après FELIU, 2008)

À partir des II^{ème}-I^{er} siècles avant J.-C., les cités gauloises possèdent des centres économiques et politiques fortifiés : les oppida. Le principal oppidum connu dans les Vosges du Nord est l'oppidum du Fossé des Pandours de Saverne (Figure I.2-9). Sa position stratégique au col de Saverne lui permet de contrôler le passage ouest-est entre le plateau lorrain et la vallée du Rhin et de contrôler ainsi la plaine d'Alsace et les collines sous-vosgiennes (FELIU, 2009). Cet oppidum est considéré comme la capitale de la cité des Médiomatriques de la fin du II^e siècle au début du I^{er} siècle avant J.-C., avant que l'oppidum de Metz le remplace (FELIU, 2009 ; MENGUS, 2011). Les fouilles effectuées sur cet oppidum témoignent d'une pratique agricole et de la présence d'un atelier de production de céramique, d'un atelier métallurgique ainsi que d'un atelier monétaire qui produisait les potins (alliage de cuivre, de plomb et d'étain) dits « au sanglier », considérés comme une production commune aux Leuques et aux Médiomatriques (FELIU, 2009 ; SCHMIT, 2013). Quelques-uns de ces potins « au sanglier » ont également été découverts dans le Pays de Bitche, à Kalhausen, Hottviller et Rimling (Figure I.2-10).



Figure I.2-10 : Deux faces d'un potin « au sanglier », Rimling (SCHMIT, 2015, cliché : S. Schmit)

Aucun oppidum n'a été identifié dans le Pays de Bitche mais il existe six sites de hauteurs fortifiées (SCHMIT, 2008). Bien qu'ils soient tous attribués à la Protohistoire, seuls deux d'entre eux ont fourni des éléments de datation plus précise.

- Le Ring d'Haspelschiedt (commune d'Haspelschiedt, pays couvert) est un éperon barré possédant un rempart de contour, constitué de sable et de blocs de grès, et un rempart de barrage (de huit mètres de haut), le tout délimitant une surface de 3,8 ha (SCHMIT, 2008). Les remparts devaient être surmontés de palissades en bois qui auraient nécessité le déboisement des pentes de l'éperon (SCHMIT, 2008). Deux éléments de datation (porte à ailes rentrantes de type Zangentor et présence de deux types de rempart) placent la construction du Ring à la Tène finale, entre 150 et 50 avant J.-C..
- La Burg de Ratzwiller est un éperon barré dont la construction, assez semblable à celle du Ring, semble remonter à la Tène.
- L'enceinte de Gruenberg est située en forêt de Mouterhouse. Le même type de rempart qu'au Ring et à la Burg y est retrouvé. Son emplacement pourrait être lié à l'« exploitation très précoce du minerai de fer dans le massif du Hochkopf, dès l'époque protohistorique » (SCHMIT, 2008, p. 13).
- L'éperon barré du Hausberg est situé sur la commune de Baerenthal.
- L'habitat fortifié de hauteur de Volmunster-Weiskirch se situe dans la partie découverte du Pays de Bitche. Ce site a été fouillé et a livré des indices d'habitat comme un probable grenier, des fragments de céramique fine, des bracelets en verre et en bronze, des fragments de fibules en fer, d'une meule en grès ainsi que des ossements animaux

(chevaux, vaches, moutons, chèvres) (FLOTTE & FUCHS, 2004 ; SCHMIT, 2008). Le mobilier serait daté de la fin de l'âge du Fer (130-80 av.J.-C.).

- Au lieu-dit de « Auf der Burg », également situé en pays découvert, près de la frontière allemande, se trouve une construction pouvant être assimilée à une enceinte, localisée au milieu d'un ensemble de nécropoles tumulaires.

Tous ces sites sont localisés à des positions stratégiques, à proximité d'une ou plusieurs voies de communication longeant les Vosges du Nord ou permettant de les traverser.

En dehors des oppida et des sites fortifiés, la cité des Médiomatriques possède de nombreuses fermes de tailles variables (FREYSSINET, 2007 ; MEYER & NÜSSLEIN, 2014). Des céréales (avoine, blé, millet, orge), des légumineuses (féverole, lentille, pois, vesce) ainsi que des plantes oléagineuses ou textiles (lin, pavot, caméline) y sont cultivées (FICHTL *et al.*, 2004 ; MENGUS, 2011).

Entre 109 et 102 av.J.-C., la cité des Médiomatriques subit une période d'invasions par les peuples de l'Est (Limbes, Teutons, Ambrons) et au Ier siècle av.J.-C., la poussée des peuples germaniques provoque l'intervention de Jules César contre Arioviste, chef germanique vaincu en 58 av.J.-C.. C'est le début de la conquête romaine et de la Guerre des Gaules (-58-52 av J.-C.). Les Médiomatriques perdent leurs territoires rhénans où s'installent les Triboques. La « Pierre des douze apôtres » (Figure I.2-11), située sur la commune de Meisenthal au bord d'une très ancienne voie de communication marque de nos jours la limite entre la Lorraine (Meisenthal) et l'Alsace (Wingen-sur-Moder) et aurait pu être une borne délimitant la frontière entre la cité des Médiomatriques et celle des Triboques (FLOTTE & FUCHS, 2004 ; JEHIN, 2005 ; MENGUS, 2011). Les Vosges deviennent alors une zone de frontière entre la Gaule Belgique et les futures provinces de Germanie (MENGUS, 2011). C'est lors de ces temps de troubles que les sites fortifiés comme le Ring d'Haspelschiedt voient le jour et que Metz serait devenue la capitale des Médiomatriques, à la place de Saverne.



Figure I.2-11 : La « Pierre des 12 apôtres », Meisenthal (Moselle) (source : wikipedia.org)

I.2.1.5. La période romaine : 2000-1450 cal. BP / 50 cal. BC-500 cal. AD

L'époque gallo-romaine, qui débute à la fin de la Guerre des Gaules, suite à la défaite de Vercingétorix en 52 av.J.-C., est la période qui a livré le plus grand nombre de vestiges archéologiques dans le Pays de Bitche (Figure I.2-12).

Cette période voit la modification du mode de vie des Médiomatriques qui adoptent de nombreuses innovations romaines, notamment dans l'urbanisme (rue dallée, forum, thermes...) (MENGUS, 2011). Les oppida sont abandonnés et les villas romaines voient le jour avec des constructions pour lesquelles le bois laisse sa place à la pierre.

L'abondance de ces découvertes semble indiquer une occupation importante du territoire, surtout en pays découvert, protégé par sa situation géographique à l'ouest du *Limes* romain, qui longe le Rhin et du massif des Vosges du Nord, formant une barrière naturelle (SCHMIT, 2009). De plus, les objets retrouvés dans le pays découvert, à l'image des fragments de meules et des vestiges d'un bâtiment servant au parcage du bétail (écurie, étable ?) à Rimling, attestent d'activités agro-pastorales sur les terrains fertiles.

des Vosges étaient occupées, le cœur du massif forestier dense étant resté très sauvage (BEGEOT *et al.*, 2019 ; BOUGEL, 2004 ; JEHIN, 2005). En effet, à l'époque gallo-romaine, les populations s'installaient de préférence dans des milieux ouverts tels que le plateau lorrain, la plaine d'Alsace ou le piémont vosgien (JEHIN, 2005). Cependant, les forêts des Vosges du Nord étaient traversées par des voies de communication dont quelques-unes existaient déjà aux périodes antérieures (Figure I.2-14) (BEGEOT *et al.*, 2019 ; JEHIN, 2005 ; MENGUS, 2011 ; PARMENTIER, 2007 ; SCHMIT, 2009). L'un des témoins de ce réseau routier est l'élément de voirie gallo-romain découvert à Bitche (lotissement Pfarrgarten), qui pourrait avoir été une voie reliant la plaine d'Alsace au plateau lorrain (MENGUS, 2011 ; SCHMIT, 2009). D'autres voies gallo-romaines sont connues comme à Rimling ou encore à Rohrbach, bien que leur attribution à cette période doive encore être étayée.



Figure I.2-13 : Rocher des Trois Figures, Lemberg (crédit : mairie de Lemberg)

À partir de la seconde moitié du III^{ème} siècle, suite à l'abandon du *Limes* romain en 260, l'ancien territoire médiomatrique doit faire face aux grandes invasions des peuples dits « barbares » (Alamans, Vandales, Huns, Francs). Progressivement le pouvoir romain laisse la place aux Alamans puis aux Francs qui donnent naissance à la dynastie des Mérovingiens, après le baptême de Clovis en 496.

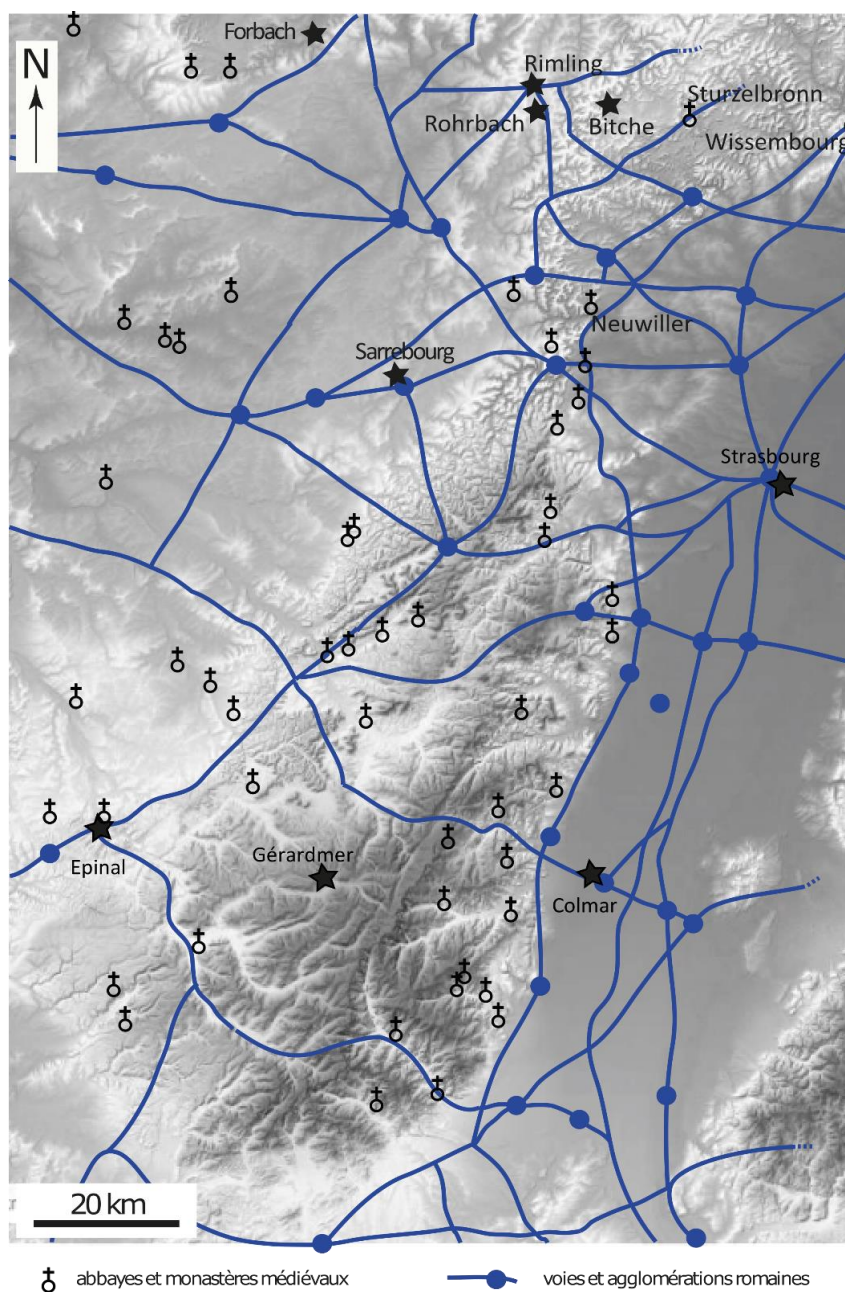


Figure I.2-14 : Carte des voies romaines et des abbayes et monastères médiévaux du Massif des Vosges (modifiée d'après BEGEOT *et al.*, 2019)

I.2.1.6. Du Moyen Âge à nos jours : 1450 cal. BP / 500 cal.AD

Les découvertes archéologiques recensées sont rares pour l'époque mérovingienne dans les Vosges du Nord, tout comme celles du Haut Moyen Âge dans le Pays de Bitche (Figure I.2-15).

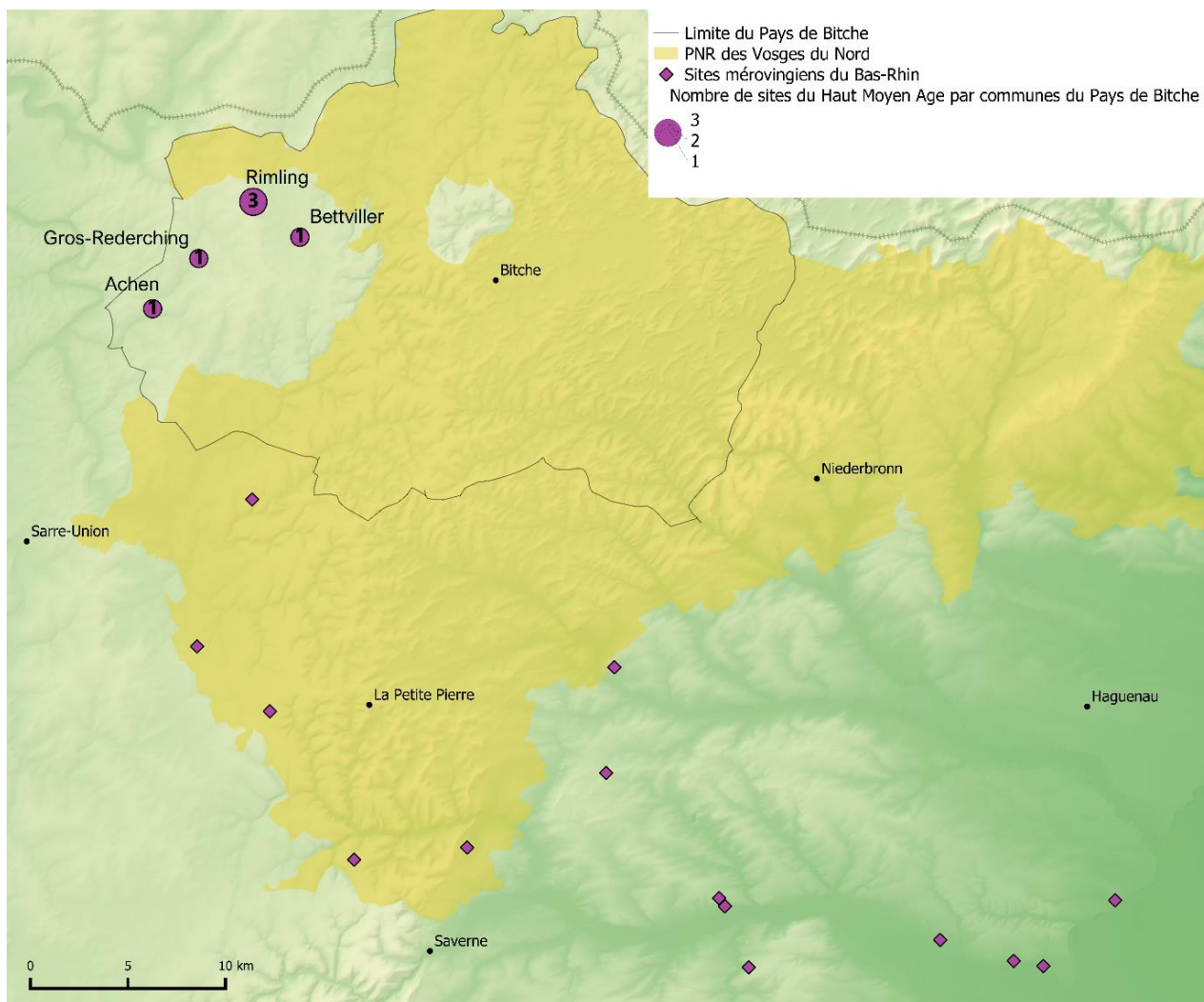


Figure I.2-15 : Localisation des découvertes du Haut Moyen Âge dans le Pays de Bitche (d'après SCHMIT et al. 2017) et de l'époque mérovingienne dans le département du Bas-Rhin (d'après la Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTI2 ©IGN,)

Après la mort de Clovis en 511, son royaume est divisé entre ses fils et le Pays de Bitche fait alors partie de ce qui deviendra l'Austrasie. Les VI^{ème} et VII^{ème} siècles sont caractérisés par une première vague de fondation d'abbayes et de monastères en Alsace et en Lorraine, sur les marges du massif comme à Wissembourg ou à Neuwiller (Figure I.2-14). Sous la dynastie des Carolingiens, en 843, le Traité de Verdun divise le Royaume de Charlemagne entre ses petits-fils. Lothaire Ier hérite de la Francie médiane qui deviendra plus tard la Lotharingie, située entre la Francie occidentale et la Francie orientale (qui deviendra la Germanie, le futur Saint Empire Romain Germanique) (Figure I.2-16).

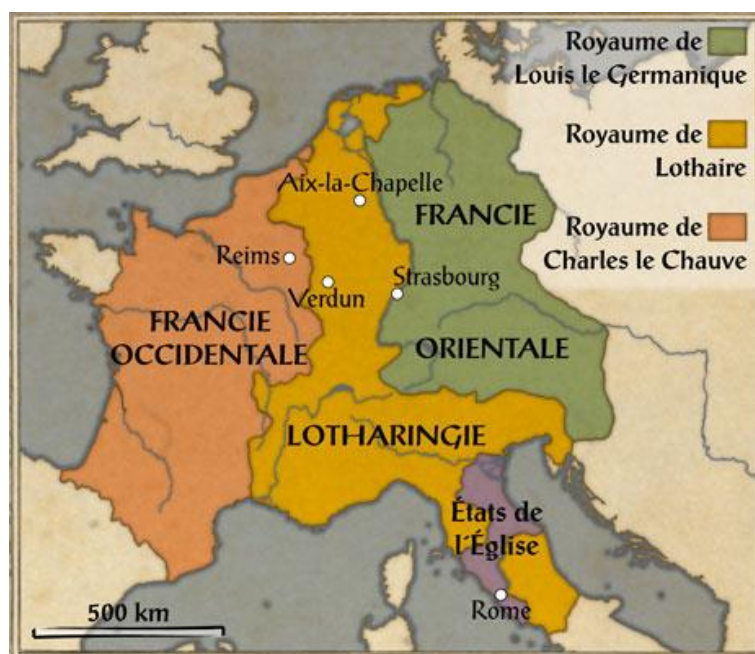


Figure I.2-16 : Division du Royaume de Charlemagne après le Traité de Verdun (crédit : gallimard jeunesse)

En 855, la Lotharingie est divisée et Lothaire II hérite de ce qu'il nomme la Lotharii Regnum. À sa mort en 869, la Lotharingie devient un duché sous la domination du Roi de Germanie. C'est dans ce contexte que le Duché de Lorraine est « créé » en 959.

La Seigneurie de Bitche est une entité appartenant à la Lotharingie orientale. Son origine remonterait au X-XI^e siècle (JACOPS *et al.*, 1990 ; JEHIN, 2005). Au milieu du XI^e siècle, elle est une possession des Comtes d'Alsace, mais en 1048, Henri III (Empereur du St Empire Romain Germanique) donne le Duché de Haute Lorraine à Gérard d'Alsace, seigneur de Bitche et fondateur de la maison de Lorraine (JEHIN, 2005). Vers 1170 et 1196, deux délimitations de la Seigneurie de Bitche commandées par les Ducs de Lorraine montrent que la Seigneurie possède à peu de choses près les mêmes limites que le Pays de Biche actuel (RUDRAUF, 2008).

Les XII-XIII^{èmes} siècles sont marqués par une deuxième phase de fondations d'abbayes, qui s'implantent plus au cœur du massif, comme en 1135 à Sturzelbronn (Figure I.2-14). Au cours des XII^{ème}, XIII^{ème} et XIV^{ème} siècles, de nombreux châteaux sont construits sur les rochers gréseux des Vosges du Nord (Figure I.2-17) : Bitche, Falkenstein, Fleckenstein, Helfenstein, Ramstein, Waldeck, Windstein... (HIRSCHINGER, 1991 ; MENGUS, 2009 ; RUDRAUF, 2009, 2008 ; SCHWIEN, 2016). Ces châteaux forts sont construits dans une zone de frontière entre le duché de Lorraine et l'Alsace, alors morcelée entre de nombreux seigneurs. Le nombre de châteaux

dans la région est exceptionnel rapporté à la densité de peuplement qui est très faible (SCHWIEN, 2016).

Le nombre de châteaux par commune actuelle varie entre 2 et 4 pour les Vosges du Nord alors qu'ailleurs on trouve généralement un château pour un ou deux villages. Les choix d'implantation de ces sites et l'attraction de cette région restent encore inexpliqués (SCHWIEN, 2016).

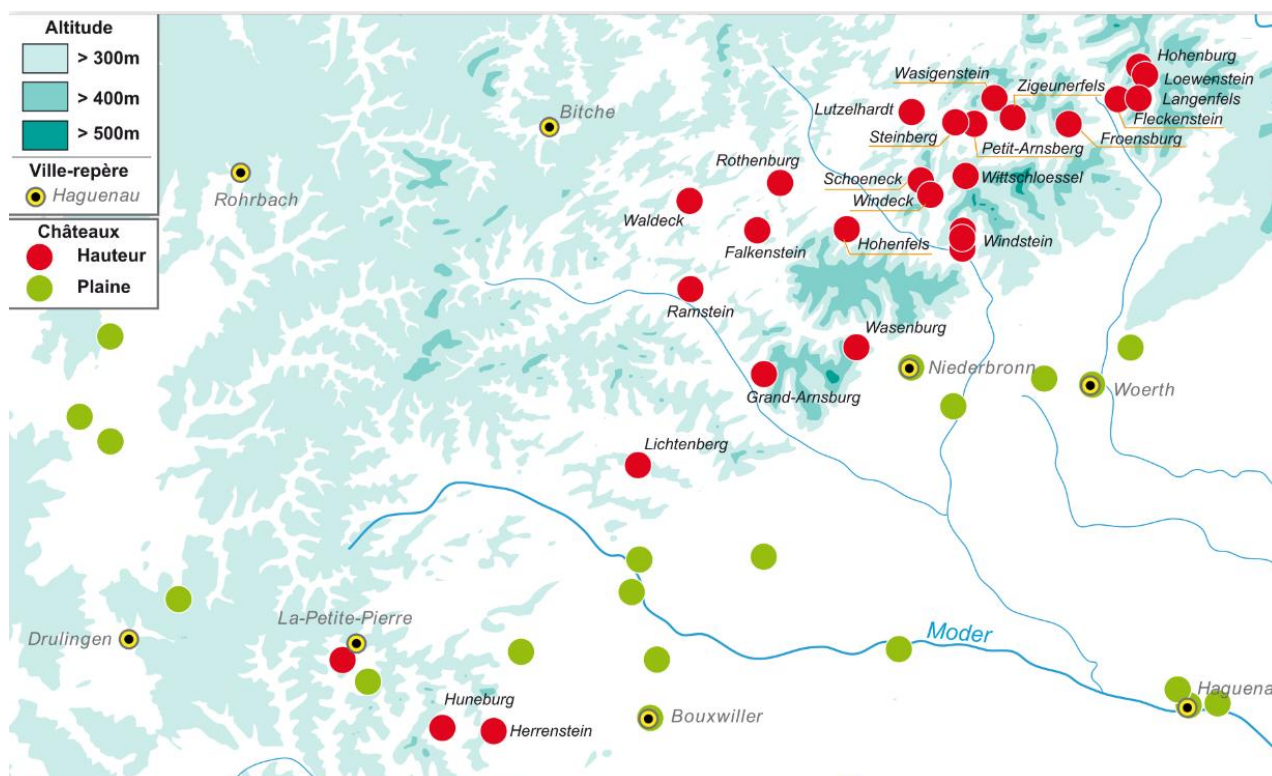


Figure I.2-17 : Localisation des châteaux dans les Vosges du Nord (extrait d'après SCHWIEN, 2016)

En 1297, la Seigneurie de Bitche passe aux mains du Comte de Deux-Ponts et devient le Comté des Deux-Ponts-Bitche. Les XIV^{ème} et XV^{ème} siècles vont être marqués par les conflits de la Guerre de Cent Ans (1337-1453) ainsi que par plusieurs épisodes de peste noire (1348, 1411-1439) et des famines (BÜNTGEN *et al.*, 2011).

Le XVI^{ème} siècle apparaît ensuite comme une période de forte croissance démographique. En 1525, le Pays de Bitche, tout comme le reste de l'Alsace, est frappé par une révolte paysanne appelée « Guerre des Rustauds ». En 1531, le Comté de Bitche, resté jusque-là aux Deux-Ponts-Bitche passe aux mains de Philippe V, Comte de Hanau, qui le réunit à la Seigneurie de Lichtenberg. Mais en 1572, Charles III, duc de Lorraine, s'empare de la ville de Bitche et de son

château et annexe le Comté de Bitche afin de contrôler la région que Philippe V tente de faire basculer dans le Protestantisme. Le Comté est ainsi réuni au Duché de Lorraine.

Le XVII^e siècle est marqué par les combats de la Guerre de Trente ans (1618-1648). Dès 1621, Saverne, Haguenau et Wissembourg sont le lieu de sièges et de pillages par les soldats protestants. En 1632, c'est au tour des Suédois d'atteindre la région. Les traités de Westphalie, signés le 24 octobre 1648, mettent fin aux trente années de guerre mais les Vosges du Nord sortent du conflit complètement dévastées et dépeuplées. Malgré la fin de la Guerre de Trente ans, l'instabilité politique perdure et les conflits s'enchaînent sur le territoire, qui subit une alternance de périodes d'occupation et d'indépendance. À partir de 1679, Louis XIV occupe le Comté de Bitche et fait ériger la Citadelle de Bitche par Vauban (Figure I.2-18).

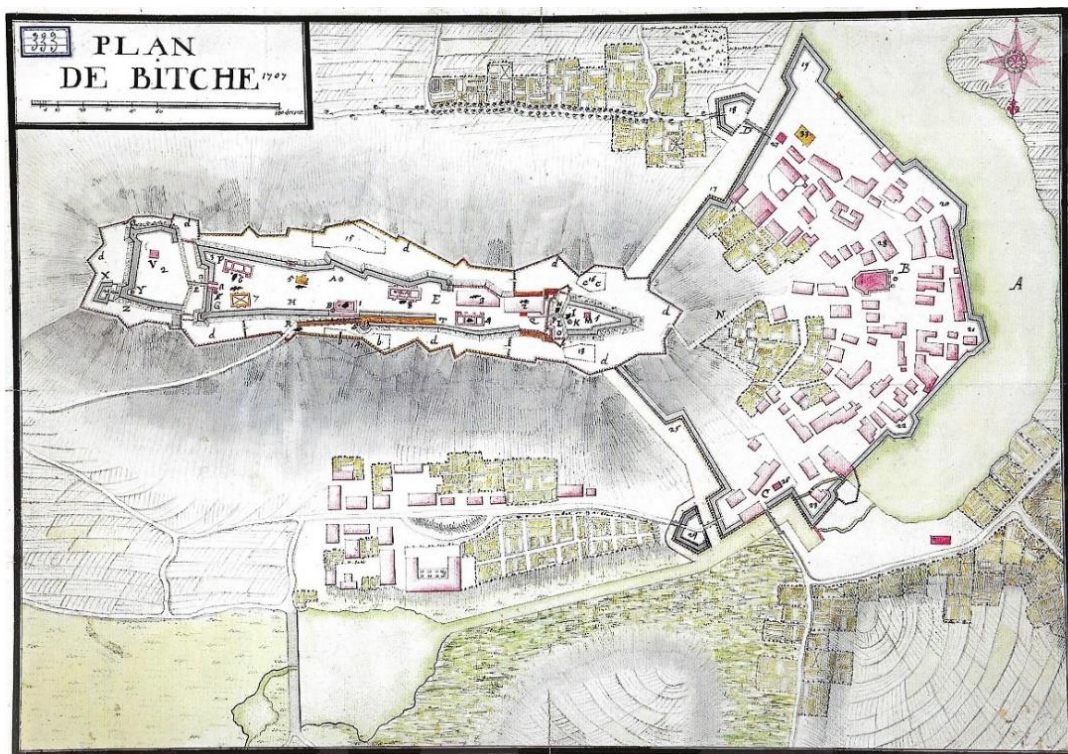


Figure I.2-18 : Plan de Bitche en 1707 (source : SKORKA, 2006, Archive départementales de la Moselle)

Le futur Pays de Bitche devient ainsi français, mais en 1697, suite à la Paix de Ryswick, Leopold, Duc de Lorraine, reprend possession de son Duché. Cette date marque le début d'une période de paix pour le Duché de Lorraine. Le duc cherche à repeupler le territoire en attirant des peuples venus de toute l'Europe. Commence alors une phase de croissance

démographique, économique et industrielle sans précédent qui ne parviendra au Comté de Bitche que dans les années 1720-1730.

En 1737, le Traité de Vienne met fin à la guerre de succession de Pologne et fait du Duché de Lorraine une possession de Stanislas Leszczyński, roi de Pologne et beau-père de Louis XV. Le Duc de Lorraine François III renonce à son Duché pour devenir Empereur d'Autriche. Le traité stipule qu'à la mort de Stanislas le Duché de Lorraine reviendra à la Couronne de France, ce qui advient en 1766.

La suite de l'histoire du Duché de Lorraine, de la Lorraine et donc du Pays de Bitche est bien connue et abondamment documentée :

- 1870-71 : Guerre franco-prussienne, siège de Bitche et annexion à l'Empire allemand suite au traité de Francfort ;
- 1918-19 : fin de la 1^{ère} Guerre Mondiale et retour à la France suite au Traité de Versailles (1919) ;
- Construction de la Ligne Maginot à partir de 1929 ;
- 1940-45 : 2^{nde} Guerre Mondiale, ré-annexion par l'Allemagne puis retour à la France.

I.2.2. Histoire industrielle des Vosges du Nord

Il serait trop prétentieux de présenter ici la totalité des activités humaines industrielles des Vosges du Nord tant elles ont été nombreuses (mines, forges, verreries, activité pétrolière, carrières de grès, scieries, ...). Cette partie présentera uniquement deux de ces activités qui étaient très présentes, au cours du temps, dans toute la région (Figure I.2-19) : la verrerie et la métallurgie.

I.2.2.1. Les activités de verrerie

Le verre, apparu en Mésopotamie au Vème millénaire avant notre ère, s'est diffusé en Europe au IIIème millénaire. Le premier objet en verre découvert au Pays de Bitche est une perle (Rimling) datant de l'âge du Bronze (cf §2.1.2.1). À cette époque, les objets en verre n'étaient pas fabriqués localement mais étaient importés d'Orient ou d'Italie (SCHMIT, 2015).

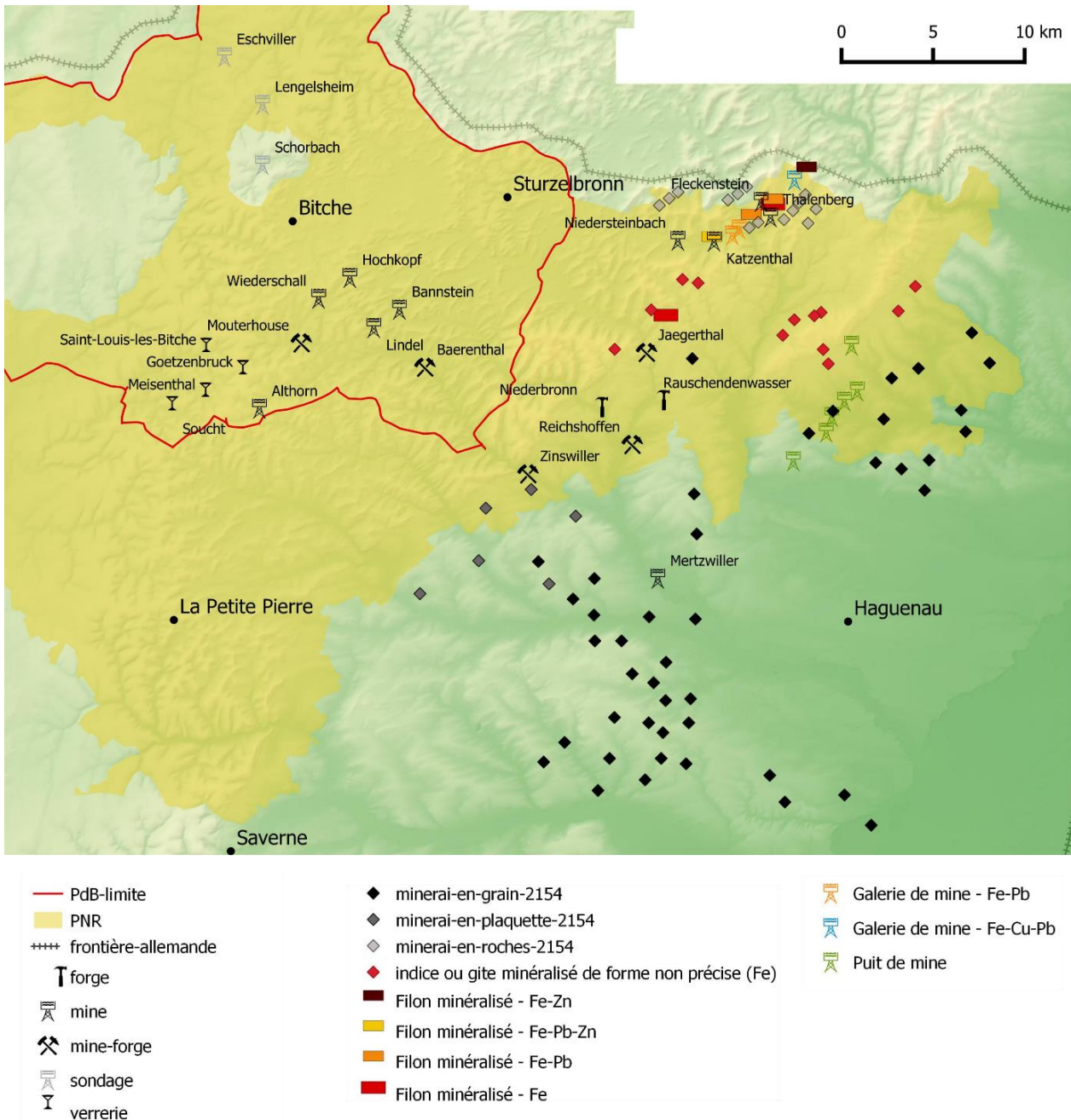


Figure I.2-19 : Carte des sites industriels (minerais, mines, forges et verreries) des Vosges du Nord (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTI2 ©IGN, Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004)

Il est fort probable que les premières verreries des Vosges du Nord remontent à l'époque gallo-romaine. À partir du XI^{ème} siècle, les abbayes soutiennent l'établissement de verreries dans la Vôge, mais ce n'est qu'au XV^{ème} siècle que l'on trouve les premières traces écrites de verreries dans les Vosges du Nord. À l'époque médiévale, le verre est essentiellement utilisé pour la fabrication des vitraux et déjà les Vosges du Nord apparaissent comme une région particulière : le plus ancien vitrail figuré de France, représentant une tête est réalisé en 1060 et provient de l'abbatiale de Wissembourg (Figure I.2-20) (MARTIN, 2015).



Figure I.2-20 : Tête d'homme dite "Christ de Wissembourg" (source : musees.strasbourg.eu)

Dès la fin du Moyen Âge (XV^{ème} siècle), le Pays de Bitche est une « terre de verre ». L'installation de verreries dans cette région s'explique par la présence au même endroit de tous les ingrédients nécessaires à la fabrication du verre : la silice, le combustible, le salin et l'eau.

- La silice, ingrédient de base de la pâte de verre, est issue du sable provenant de la désagrégation du grès rose des Vosges affleurant partout dans la région. Le sable constituant les grès roses des Vosges n'a cependant jamais permis d'obtenir un verre incolore à cause de sa forte teneur en oxyde de fer qui lui donne une teinte verdâtre.
- Les forêts denses et omniprésentes des Vosges du Nord fournissent le combustible dont les usines ont abondamment besoin. Le chêne ou le hêtre sont préférentiellement utilisés en fonction des étapes de fabrication.
- Le salin, riche en potasse, est utilisé comme fondant permettant d'abaisser la température de fusion de la silice, et est obtenu à partir de cendres de fougères, de bruyères, très abondantes sur sols acides ou encore de petits bois dont essentiellement du hêtre.
- Les cours d'eau, bien présents dans la région sont utilisés pour nettoyer le sable et le débarrasser de toutes les possibles impuretés (matière organique...).

En 1448, le duc de Lorraine cherche à attirer les artisans verriers dans la région en leur offrant le statut de gentilhomme ainsi que des exemptions fiscales. Des verriers immigrèrent alors de

Bohême et de Bavière. À l'époque, le verrier s'installe au plus près des ressources, dans un bois concédé par un seigneur, souvent dans des fonds de vallons et à proximité des cours d'eau. Il y dégage une clairière au sein de laquelle il construit la *Stützenhütte*, une construction de bois où aura lieu la production, ainsi que les différents ateliers (comme le *Pottaschhütte*, lieu de production de la potasse). La verrerie est alors itinérante : quand le combustible situé à proximité de l'installation est épuisé et que l'acheminement du bois devient trop difficile, le verrier déménage. Le besoin en bois (surtout du hêtre) est énorme car il s'agit du seul combustible disponible pour maintenir la température de fusion de la silice qui, même une fois abaissée par le fondant, atteint les 1400°C.

Au début du XVI^{ème} siècle, les verreries se sédentarisent. Le duc de Lorraine encourage l'installation des verreries dans le Duché et dans le Pays de Bitche (JEHIN, 2005). Une verrerie est alors mentionnée à Münzthal en 1586. Avec la sédentarisation, les verreries, qui consomment des quantités colossales de bois se voient affecter des cantons forestiers. En effet, les seigneurs concèdent aux verriers, des cantons de leur forêts et les droits d'usage habituels (marnage, affouage, panage), ce qui leur permet de rentabiliser leurs bois à une époque où la forêt est sans grande valeur et rapporte peu aux propriétaires. Les verriers vont ainsi déboiser pour s'approvisionner en combustible, élever du bétail, et également essarter pour installer des champs et des prés.

Les verreries vont se maintenir longtemps dans la partie couverte du Pays de Bitche grâce à la disponibilité du combustible, qui est récolté sans souci de préservation de la forêt. Cependant, des conflits sont rapportés entre les maîtres verriers et les paysans qui souhaitent conserver les forêts pour y mener leurs troupeaux à la pâture. De plus, malgré les affectations, les parcelles ne sont parfois pas suffisantes pour assurer le fonctionnement des verreries et les verriers se voient dans l'obligation d'arrêter leur activité quand ils n'ont pas les moyens d'acheter du bois supplémentaire.

À partir des années 1540-1550, une crise éclate pour l'industrie verrière de Lorraine suite, d'une part, à la mise en place d'une politique de monopole commercial sur la production de verre, et, d'autre part, à un ralentissement économique et un manque de bois dont le prix a également augmenté (MARTIN, 2015). Les verriers quittent alors la région pour la France, la Suisse ou les Pays-Bas.

La Guerre de Trente ans (1618-1648) dévaste la région et la majorité des verreries est complètement détruite. Seule la verrerie de Soucht, créée en 1629, est épargnée par la guerre. Ce n'est qu'en 1697, que le duc Leopold réussit à relancer l'économie et les industries du Duché de Lorraine. Ainsi, dans ce contexte de paix et de croissance démographique et économique, les verreries s'installent à nouveau dans la région tout au long du XVIIIème siècle. La verrerie de Meisenthal, actuellement célèbre pour ses fameuses boules de Noël, voit alors le jour en 1702, sur les fondations d'une ancienne verrerie. Dans le bail de cette nouvelle verrerie, le seigneur concède de nombreuses ressources telles que le bois, le sable ainsi que des terrains (MARTIN, 2015). De nombreuses autres verreries voient le jour au cours de ce siècle (Figure I.2-19) : Goetzenbruck (1721), les verreries de Saint-Anne à Baccarat (1764), la cristallerie de Saint-Louis (1767, Figure I.2-21). Cette dernière, construite à l'emplacement de l'ancienne verrerie de Münzthal, deviendra en 1781, la première manufacture d'Europe continentale à mettre au point la fabrication de cristal au plomb, alors connue uniquement des Anglais (MARTIN, 2015). La consommation en bois des verreries et cristalleries dégrade rapidement les forêts et les mesures prises pour tenter de les conserver s'avèrent souvent inefficaces. Des émeutes paysannes éclatent alors afin des dénoncer l'utilisation excessive des forêts par les usines et leurs nombreux abus, comme à Bitche en 1769 (MARTIN, 2015).

À partir des années 1865-1870, les usines se dotent des nouveaux fours à charbon et en 1866, la cristallerie de Saint-Louis éteint son dernier four à bois, mettant fin à quatre siècles d'exploitation soutenue des forêts.

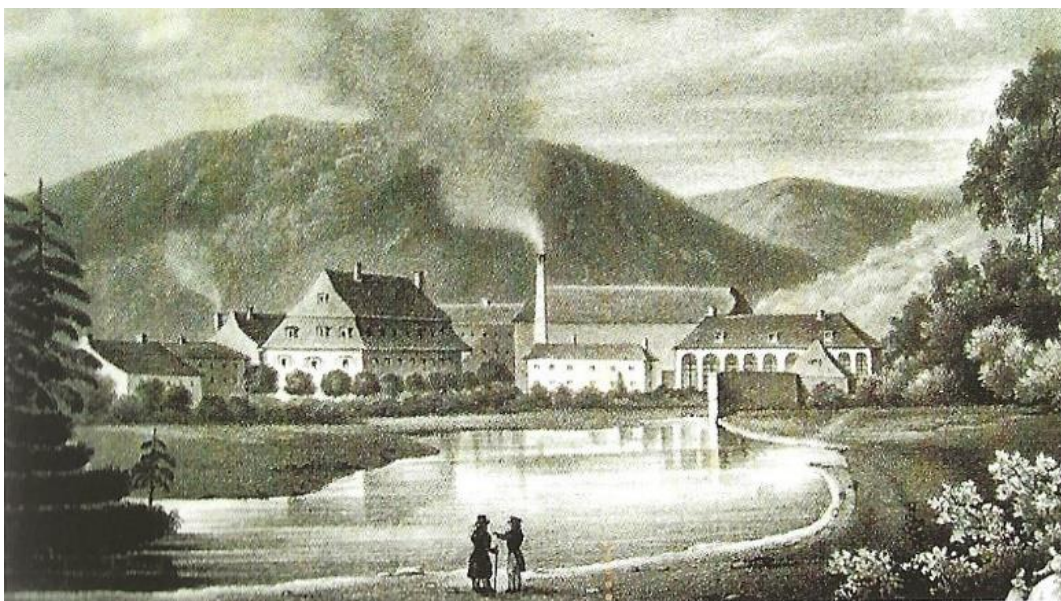


Figure I.2-21 : Lithographie de la cristallerie de Saint-Louis du début du XIXème siècle (source : MARTIN, 2015)

I.2.2.2. Les activités métallurgiques

À partir du XVII^e siècle, les verreries ne sont plus les seules à exploiter la forêt comme source de combustible. La métallurgie se développe dans les Vosges du Nord où elle y trouve toutes les ressources nécessaires.

Le métal et les premières activités métallurgiques se diffusent en Europe occidentale dès l'âge du Bronze, constituant une innovation caractéristique de cette période (CAROZZA & MARCIGNY, 2007). Déjà extrait dans les Balkans à la fin du VI^e – début du Ve millénaire avant notre ère, le cuivre et sa métallurgie arrive dans les Alpes du Nord, en Suisse et en Italie du Nord vers 3800-3500 av.J.-C.. À partir de la seconde moitié du IV^e millénaire avant notre ère, les premiers objets en cuivre retrouvés dans le nord de la France, sont importés ou échangés. Le minerai est présent en France bien qu'inégalement réparti mais la métallurgie n'est pas encore maîtrisée par les populations locales. Le plus ancien objet métallique trouvé dans le nord-est de la Moselle est une hache en bronze découverte à Rimling *Kohlhecke* (Figure I.2-22, Schmit *et al.* 2008 ; Schmit 2015). Cet objet rare est constitué de cuivre gris, minerai exploité à partir du début du III^e millénaire avant notre ère, c'est-à-dire à la transition Néolithique final-âge du Bronze. C'est souvent à cette époque que l'on situe le début de la diffusion du cuivre dans la région Sarre-Lorraine-Luxembourg (SCHMIT *et al.*, 2008).



Figure I.2-22 : Hache plate en cuivre de Rimling "Kohlhecke" photographie (T.Lucas-©MNHA)

La métallurgie des alliages (comme le bronze) est originaire d'Anatolie et d'Égée et est attestée en Europe centrale et occidentale au début du II^e millénaire avant notre ère.

La métallurgie du fer, également venue d'Anatolie, se développe en Europe occidentale dans les premiers siècles du Ier millénaire avant notre ère, à la période de l'Hallstatt (MANGIN, 2004). Ce n'est cependant qu'à partir de la Tène (IIème et Ier siècle avant J.-C.) que le fer devient un matériau courant (MANGIN, 2004).

Le sous-sol des Vosges du Nord possède de petits gisements de fer, disséminés sur le plateau lorrain et dans la région du piedmont alsacien (VOGT, 1986). Le fer est présent sous forme oolithique ou pisolithique sur les bordures du massif (ROGER, 2007 ; SKRZYPEK & CRUZ MERMY, 2007). Les grès du Buntsandstein, de couleur rouge, constitue un réservoir d'oxydes de fer qui, mobilisés par l'eau, ont imprégné des failles (SELL *et al.*, 1998). Des filons de minerai de fer sont ainsi présents dans les grès, comme le filon de limonite d'Althorn, indiqué sur la feuille Lille-Bruxelles de la Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000 (Figure I.2-23) (MELOUX *et al.*, 1987). Le minerai extrait des grès présentait cependant une qualité médiocre avec une teneur en fer de 18 à 21% (HUSSON, 1995).

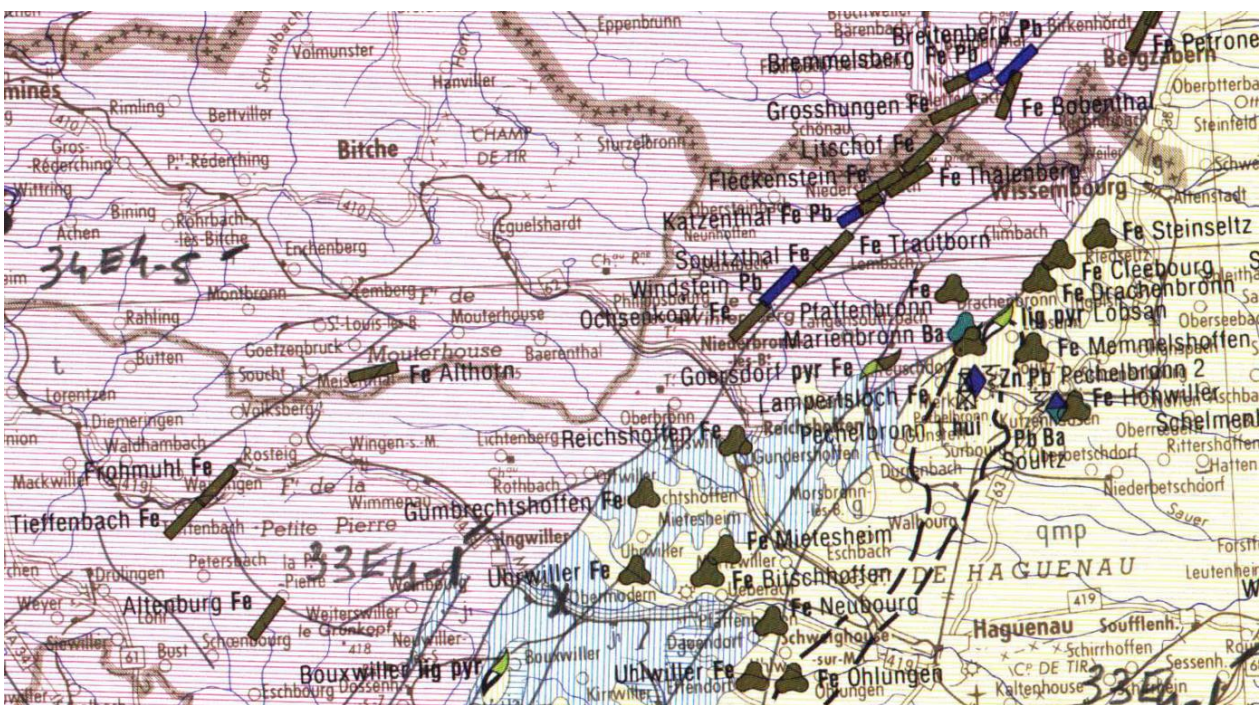


Figure I.2-23 : Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000, feuille Lille-Bruxelles (source : MELOUX *et al.*, 1987)

De nombreux gîtes de fer étaient exploités sur le piedmont alsacien, à Reichshoffen, Zinswiller, Mertzwiller ou encore Jaegerthal. Il s'agissait de minerai de fer en plaque ou en grain, constitué d'oxyde de fer inclus dans des argiles, des limons argileux ou des sables alluviaux (MENILLET *et al.*, 2015).

Dans le Pays de Bitche, il semble que des filons de minerai de fer, présents dans les grès du Buntsandstein, aient pu être exploités dès l'âge du Fer en forêt de Mouterhouse (SCHMIT *et al.*, 2017) et des camps celtiques ont été découverts à proximité de sites d'extraction de minerai de fer sur le plateau lorrain (JEHIN, 2005). Lors de la période Gallo-romaine, d'autres découvertes attestent également d'activités de forge comme dans la villa d'Achen, dans le pays découvert (Ier av. J.-C.-IVème siècle ap. J.-C.) ou l'atelier de bronzier de Walschbronn, également en pays découvert (fin IIème-IIIème ap. J.-C.). Sur le versant alsacien des Vosges du Nord, l'extraction et le travail du fer ont été démontrés dans la ville de Reichshoffen, dans laquelle des traces de bas-fourneau de l'époque Gallo-Romaine, caractérisées par la présence de scories riches en fer sur une zone d'argile rougie ont été décrites (FLOTTE *et al.*, 2000).

Le bas-fourneau est un procédé permettant l'obtention direct de fer. Du minerai et du charbon de bois sont chargés dans le fourneau qui atteint des températures proches de 1200°C, permettant la réduction du minerai. À la sortie du fourneau, le laitier et les scories qui correspondent à la gangue de minerai fondue, sont rejetés alors que la loupe de fer (à l'état pâteux) reste à l'intérieur.

Au cours du temps, plusieurs mines seront ouvertes dans les Vosges du Nord, et exploiteront des filons ferrifères et cuprifères, comme celles de Jaegerthal, Katzenthal, Fleckenstein, Thalenberg (JEHIN, 2005 ; LEYPOLD, 1996). Des mines de fer ont été également exploitées dans le comté de la Petite Pierre (entre Volksberg et Weislingen par exemple) ainsi que dans le Pays de Bitche près de Baerenthal, Mouterhouse (Hochkopf, Althorn, Bannstein) ou encore près de Bitche. Depuis la fin du Moyen Âge, on y extrayait de la mine en roche via soit de profondes galeries en forêt (Figure I.2-24), comme à la mine du Hochkopf près de Mouterhouse, soit des tranchées (Kraft 2012, Schmit communication personnelle).



Figure I.2-24 : Galerie d'extraction du minerai de fer dans le Pays de Bitche (cliché : S. Schmit)

La forêt garde encore de nos jours de nombreuses traces laissées par l'extraction du minerai, comme la halde (amas de déchets) de la mine de Wiederschal (Mouterhouse) ou par les sondages (Kraft J.-P. et Schmit S. communication personnelle).

La présence de minerai et les évidences de son exploitation ancienne dans le massif des Vosges du Nord justifient en partie le développement de l'industrie métallurgique dans la région. De fait, en 1580, des prospecteurs du duc de Lorraine (re)découvrent la présence de minerai de fer dans le Pays de Bitche, aux environs de Mouterhouse et au cours des XVIème et XVIIème siècles, les ducs de Lorraine vont chercher à exploiter les richesses minières de la région en encourageant l'installation de sites métallurgiques (JACOBS *et al.*, 1990 ; JEHIN, 2005). Malgré sa qualité médiocre (teneur en fer de 18 à 21%), le minerai de fer local, extrait des grès ferrifères, a constitué la base de l'exploitation métallurgique de la région jusqu'au milieu du XIXème siècle (HUSSON, 1995 ; VOGT, 1986).

Outre la présence de minerai local, les besoins considérables en combustible pour alimenter les forges font des Vosges du Nord, où les forêts sont présentes en abondance, une région de choix. En effet, les activités métallurgiques, comme les verreries, ont besoin de bois en quantité abondante. En revanche, pour la métallurgie, le bois est utilisé sous forme de charbon de bois, nécessitant alors avant toute chose un travail forestier et charbonnier (Figure I.2-25).

Les plateformes charbonnières, sur lesquelles on dispose les meules permettant la fabrication de charbon de bois, sont extrêmement abondantes dans les Vosges du Nord et plus particulièrement dans le Pays de Bitche où leur apparition est datée du milieu du XVIIème siècle (Gocel-Chalté *et al.* 2020).

Le réseau hydrographique dense des Vosges du Nord joue également un rôle non négligeable dans l'installation de l'industrie métallurgique dans la région car il permet de recourir à l'énergie hydraulique. Ainsi, les forges seront très souvent installées dans le cours supérieur des cours d'eau au niveau de zones au relief accentué, permettant d'alimenter les marteaux et martinets.

Au XVIIème siècle, le bas-fourneau n'est plus utilisé et la sidérurgie utilise alors les haut-fourneaux. Le haut-fourneau, apparu entre le XIIIème et le XVIème siècle, est un procédé indirect d'obtention du fer, dans lequel le premier produit obtenu est la fonte. Le minerai, après lavage et concassage, est chargé dans le fourneau avec le charbon de bois et la castine (CO_3Ca) utilisée comme fondant. À la fin du processus, on obtient du laitier, qui est rejeté, et de la fonte

liquide qui forme des gueuses. La fonte peut être soit utilisée directement pour produire des objets en fonte, soit envoyée à la forge d'affinage où après affinage et décarburation par martelage, elle donnera une loupe de fer qui pourra à son tour être retravaillée. Le passage au procédé indirect a nécessité l'installation des fourneaux à proximité des cours d'eau, afin de bénéficier de l'énergie hydraulique, activant les soufflets et les martinets.



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale et universitaire de Strasbourg

Figure I.2-25 : Les charbonniers, Heinrich Gross, La Croix -aux-Mines, 1909 (source : Gallica.bnf.fr/BNU de Strasbourg)

C'est ainsi qu'apparaissent, parmi tant d'autres, trois grands sites métallurgiques des Vosges du Nord : la forge de Zinswiller, dont les toutes premières mentions remontent à 1591, la forge de Jaegerthal, créée en 1602 à l'initiative de Adam Jaeger, ancien administrateur d'une mine du Palatinat, et enfin la forge de Mouterhouse, construite en 1611 par Jean Valentin Dithmar, gruyer du Comté de Bitche (JEHIN, 2005). Ces trois sites apparaissent comme des « ensembles industriels intégrés depuis la fonderie du minerai natif jusqu'à la fabrication de produits finis, soit en fonte, soit en fer, résultant de l'affinage de la fonte locale » (KRAFT, 2012, p. 14). Ces trois

sites majeurs s'approvisionnent en combustible de trois manières différentes (JEHIN, 2005) : la forge de Zinswiller dépend des seigneurs qui lui délivrent du bois à sa demande et contre une redevance, la forge de Jaegerthal est alimentée par les forêts alentours pour lesquelles le maître de forge achète les droits d'exploitation, et la forge de Mouterhouse bénéficie d'une affectation de forêt comme nous l'avons vu pour les verreries.

Pendant la guerre de Trente ans, les usines s'arrêtent et les bâtiments sont très souvent détruits par les troupes suédoises. Cependant, il semble que certaines forges aient déjà été à l'arrêt, faute de minerai. En effet, en 1627, des recherches de minerai sont commandées par les autorités pour mettre fin à une pénurie de matières premières, mais malgré cela en 1629, la production de la forge de Mouterhouse est réduite à cause d'une quantité insuffisante de minerai, sûrement due à l'épuisement du minerai local (KRAFT, 2012). Les activités métallurgiques reprennent pourtant relativement rapidement, dès la fin du XVII^e siècle (JEHIN, 2005 ; KRAFT, 2012). Ainsi, par exemple, la forge de Zinswiller reprend son activité en 1651, une petite forge est créée à Baerenthal en 1705, et en 1723 la forge de Mouterhouse renaît à son tour.

Même si le minerai local joue un rôle essentiel dans l'approvisionnement des établissements jusqu'au milieu du XIX^e siècle, il apparaît que les gîtes de minerai sont souvent épuisés à partir du XVIII^e siècle. Les ressources locales deviennent donc insuffisantes pour alimenter les haut-fourneaux de la région et de nombreux conflits éclatent pour le contrôle des mines. Ainsi, à partir de cette époque, le minerai en roche est remplacé par le minerai en grain que les forges font venir depuis le piémont alsacien (KRAFT, 2012).

L'acteur majeur de l'industrie métallurgique des Vosges du Nord fut la Famille de Dietrich. La saga familiale commença en 1684 lorsque Jean Dietrich (dit Jean II), banquier de Strasbourg, racheta la forge de Jaegerthal. Par la suite, c'est son petit-fils, Jean III de Dietrich (anobli par Louis XV) qui devint maître de forge et constitua « l'empire des de Dietrich » (Figure I.2-26):

- en 1766, il rachète la forge du Grafenweiher et la détruit ;
- en 1766-67, il rachète progressivement l'usine de Zinswiller ;
- il construit les forges de Reichshoffen et de Rauschendwasser en 1767, puis celle de Niederbronn en 1769 ;
- en 1771, il reconstruit la forge de Rothau, dans la vallée de la Bruche ;
- en 1843, l'entreprise de Dietrich rachète la forge de Mouterhouse.

L'entreprise de Dietrich (aujourd'hui entreprise d'électroménager et de chauffage) fut connue par ses plaques de poêles décorées, ses appareils de chauffage et sa participation à la construction ferroviaire.

L'épuisement des ressources minières locales et la concurrence entraînent progressivement l'arrêt des haut-fourneaux : Zinswiller en 1871, Niederbronn en 1880, Jaegerthal en 1885. Puis, à la fin du XVIII^{ème} siècle, l'arrivée du charbon de terre mis un terme à l'exploitation intense des forêts pour l'alimentation des haut-fourneaux.

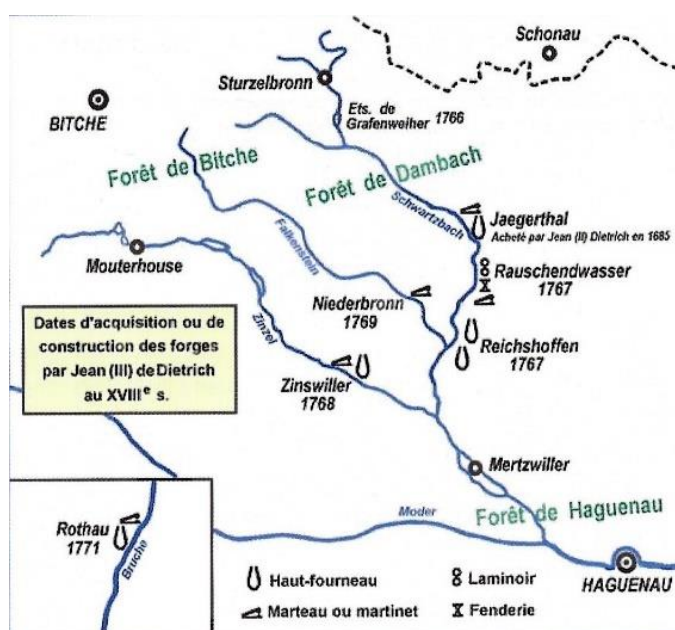


Figure I.2-26 : Localisation, construction et acquisition des usines De Dietrich (source : Musée historique et industriel de Reichshoffen)

I.2.3. Histoire des forêts des Vosges du Nord

Les archives écrites permettent aux (géographes-) historiens de tenter de reconstituer l'histoire des forêts anciennes (DION, 1970 ; GARNIER, 2000 ; JEHIN, 2005 ; ROCHEL, 2004). Les informations qu'elles contiennent sur la composition des forêts, leur étendue et leur évolution pour les époques récentes permettent aussi d'appréhender la politique de gestion des territoires forestiers aux différentes époques.

I.2.3.1. Avant le Moyen Âge

La forêt tient une place essentielle dans l'histoire de l'Humanité. En effet, au cours du temps, l'homme a vécu dans et/ou aux dépens de cet écosystème riche en ressources. La forêt apparaît comme un « espace nourricier » pour les chasseurs-cueilleurs, auxquels elle procure tout ce dont ils ont besoin pour leur survie : gibier, bois de feu, fruits (THIEBAULT, 2010). Mais, alors que les forêts viennent de se propager à la faveur du réchauffement post-glaciaire, l'arrivée de l'agriculture en Europe au Néolithique va obliger l'homme à créer des espaces pour la culture des céréales. Les populations vont donc ouvrir des clairières dans les denses forêts européennes.

Avec l'âge des Métaux et l'apparition de nouvelles industries telles que l'extraction et le travail du métal, le bois n'est plus seulement récolté pour se chauffer et construire mais devient un combustible de choix pour alimenter les fours. Ainsi, le bois, qui est un matériau aux multiples usages (chauffage, constructions, bateau, tonneau, proto-industries) acquiert une grande importance économique en Gaule. À cette époque, déjà, le paysage se divise en trois unités paysagères : l'*ager* (les cultures de céréales), le *saltus* (pâturages) et la *sylva* (la forêt) (MAZOYER & ROUDART, 2002).

Ainsi, au cours de l'Antiquité, la forêt recule encore, et ne trouve un peu de répit que lors de la chute de l'Empire Romain (GARNIER, 2018).

I.2.3.2. Le tournant du Moyen Âge

Le Moyen Âge est une période importante dans l'histoire des forêts. La croissance démographique de l'époque (liée à un petit optimum climatique entre 900-1300 ap. J.C., Le Roy Ladurie 2009) et l'implantation des abbayes dans les Vosges jouent un rôle décisif dans le recul des arbres. En effet, les moines cisterciens sont bien connus pour leur mission de défricheurs : les religieux établissent des domaines agro-forestiers, défrichent les vallées, créent de nombreux étangs. C'est le cas dans le Pays de Bitche suite à la fondation de l'abbaye de Sturzelbronn. Outre les religieux, les seigneurs et leurs paysans utilisent et entament également les forêts, de manière presque quotidienne. Des villages sont créés au cœur même de la forêt comme la future ville de Bitche (JEHIN, 2005). Partout, on cherche à étendre la surface de parcelles cultivables pour répondre aux besoins de la population croissante.

Malgré la multiplication des déboisements, la forêt reste une ressource essentielle pour les populations. Afin de jouir des « services » de la forêt, des droits d'usage sont accordés aux paysans par les propriétaires des forêts (religieux ou seigneurs). Leur mise en place permet aux seigneurs d'attirer les populations sur leurs terres. Il existe différents types de droits :

- le droit d'affouage donne le droit de se fournir en bois de chauffage, souvent par exploitation d'un taillis ;
- le droit de marnage ou marronnage concerne l'approvisionnement en bois d'œuvre ou de construction (surtout le chêne) ;
- les droits de vaine et grasse pâture autorisent la présence de bétail en forêt. Les sols pauvres des Vosges du Nord ne sont pas favorables aux cultures de céréales et offrent un rendement médiocre. Pour cette raison et afin de subvenir aux besoins nutritifs des populations, l'élevage extensif a très vite été pratiqué. Au XVIII^{ème} siècle, on élève essentiellement des porcs et des moutons, les bovins étant assez rares (HIEGEL, 2006). Cependant, à cause de la « dictature de la céréaliculture et des terres arables » (JEHIN, 2005, p. 136), les champs occupent la majorité du paysage ouvert, ne laissant que peu de place au bétail. Pour pallier ce manque de place, le pâturage en forêt apparaît comme une solution. Ainsi, la grasse pâture (ou panage ou glandée, Figure I.2-27), consiste à amener les porcs se nourrissent des glands, faines et châtaignes disponibles sur le sol forestier et dont la récolte est interdite dans les Vosges du Nord. Ainsi, les porcs restent en forêt jour et nuit mais uniquement en automne et en hiver afin de limiter les dégâts causés sur les forêts par la « dent du bétail ». En effet, cette pratique, combinée à celle de vaine pâture qui consiste à amener pâturer les troupeaux de bovins, ovins et caprins sur les terres en jachères, les friches mais surtout en forêt, entraîne d'importantes dégradations du milieu forestier, notamment à cause de l'abrutissement (consommation de la végétation des sous-bois : semis, herbacées, pousses de l'année). Cet impact des troupeaux est d'autant plus fort dans le Comté de Bitche que l'élevage y est particulièrement important. Certaines forêts seront mises en défens pour les protéger de cette pratique mais les délits et abus resteront nombreux.

La définition et l'attribution des droits d'usage ont évolué et fluctué au cours du temps en fonction de la pression démographique, des politiques de gestion et de protection de la forêt, ainsi que de la valeur du bois. Ainsi, quand la pression démographique devient trop forte, les

droits d'usage sont limités pour éviter la dégradation, voire la destruction des forêts, et assurer la « production » de bois de bonne qualité (DION, 1970 ; JEHIN, 2005). Quand les seigneurs propriétaires des terres veulent rentabiliser leur forêt, ils imposent des redevances aux paysans qui veulent jouir des droits d'usage sur leur domaine car, à l'époque, le bois n'a pas encore de grande valeur (DION, 1970). Les forêts sont alors simplement jardinées, avec une exploitation par pieds d'arbre (DION, 1970).



Figure I.2-27 : La glandée (Les Très Riches Heures du duc de Berry, mois de Novembre, Jean Colombe, XVème siècle) (source : wikipedia.org)

Outre ces droits et quelques autres non abordés ici, la forêt reste le lieu de nombreuses cueillettes et bien sûr de la chasse, souvent réservée aux seigneurs. D'autres pratiques nécessitent également des ressources forestières : les feuilles sont également souvent récoltées pour fournir du fourrage ou de la litière pour le bétail et les écorces utilisées pour les activités de tannerie.

La forêt bénéficiera d'un répit au cours des conflits de la Guerre de Cent Ans (1337-1453) et à la suite des épisodes de peste noire (1411-1439) qui entraînent une forte diminution de la démographie et un retour de la forêt (GARNIER, 2018).

I.2.3.3. L'époque moderne

Au milieu du XVI^{ème} siècle, en Alsace, les besoins en bois accrus par une population croissante entraînent la mise en place de premiers règlements de gestion du patrimoine forestier (DION, 1970 ; GARNIER, 2004). En Lorraine, il semblerait que l'intérêt des ducs pour leurs forêts ait très tôt mené à l'établissement d'ordonnances (dont la plus ancienne remonte à 1340) et engendré la constitution d'une administration forestière dès 1464 (GARNIER, 2004 ; JEHIN, 2005).

Comme nous l'avons vu, à partir du XVI^{ème} siècle, les Vosges du Nord comptent de nombreuses industries extrêmement xylophages (mines, forges, verreries). Pour répondre à leur important besoin en combustible, les mines, forges et verreries implantées dans les Vosges du Nord disposent de cantons forestiers qui leur sont affectés avec une révolution du taillis définie au moment de l'affectation (Figure I.2-28). Mais toutes ces industries vont être abandonnées suite aux conflits de la Guerre de Trente ans et au dépeuplement qui suivit.



Figure I.2-28 : Exploitation d'un canton forestier par la verrerie de Goetzenbruck (à 9 km au sud de Bitche), 1756 (source : JEHIN, 2006, Archives Nationales, NIII, Moselle 6, 2029)

Au cours de cette période de guerres, la pression anthropique diminue fortement : les terres cultivées, laissées à l'abandon ainsi que les prés et prairies n'accueillant plus de bétail, sont envahis par les friches puis par la forêt. Les forges et les verreries ont dû cesser leurs activités et n'exploitent plus la forêt. La forêt reprend donc ses droits sur de nombreuses parcelles. Cependant, l'absence d'autorité et de contrôle dans les forêts laisse libre cours à des prélèvements anarchiques de bois par les paysans et les troupes militaires (DION, 1970 ; JEHIN, 2005). Le bilan est donc mitigé. Mais, en 1670, d'importantes coupes de bois pour entamer la reconstruction et reconquérir les terres abandonnées sont documentées (JEHIN, 2005). Après la paix de Ryswick, en 1697, le Duc Léopold promulgue des édits et ordonnances pour favoriser le repeuplement du Duché de Lorraine par l'immigration, et les défrichements (exonération d'impôts, propriétés des terres défrichées...). Dans le Pays de Bitche, cette phase de croissance débute vers les années 1720-1730. La population a besoin de plus en plus de terres, les défrichements s'amplifient et la forêt fait l'objet de nouveaux déboisements. Les paysans vont également étendre leur emprise aux zones humides (notamment dans le Pays de Bitche et sur le versant alsacien) qui constituent des terres assez fertiles pour être transformées en prés (JEHIN, 2005). Ainsi, la population et notamment les ouvriers obligés de compléter leurs ressources pour assurer leur subsistance, mettent en place un système de prairies « à dos », consistant en un ensemble de fossés permettant, en fonction de la saison, le drainage ou l'irrigation du lit majeur des cours d'eau, dans les fonds de vallées (DALBAVIE, 2005 ; JACOBS *et al.*, 1990). Ce système permet la production de foin (prairie de fauche) sur des sols gorgés d'eau afin de fournir du fourrage et de la litière à quelques bêtes. Cependant, le bon fonctionnement des fossés nécessite un entretien majeur de la rivière elle-même, qui doit être régulièrement curée et nettoyée. De plus, la croissance de la population, et donc des zones peuplées, s'accompagne d'une politique « d'assainissement » ayant pour but de drainer et d'ouvrir les vallées, notamment en asséchant et en déboisant les zones humides qui souffrent d'une mauvaise réputation (eaux stagnantes, croupissantes, paludisme, malaria, feux follets).

À la fin du XVII^{ème} et au XVIII^{ème} siècle, l'exploitation des forêts dans le Pays de Bitche va atteindre une intensité encore jamais connue auparavant. La forêt acquiert une valeur forte et devient une richesse économique et stratégique (DION, 1970 ; GARNIER, 2018). Pour assurer cette richesse, la forêt doit être « cultivée » et la gestion forestière se capitalise pour rentabiliser et faire perdurer cette ressource indispensable.

À cette époque, afin d'alimenter les forges qui utilisent le bois sous forme de charbon, les activités de charbonnages se développent. Dans le Pays de Bitche, des études anthracologiques montrent que le charbonnage débute au milieu du XVII^e siècle (GOCEL-CHALTE *et al.*, 2020). De plus, c'est à cette époque que la marine hollandaise fait venir son bois d'œuvre (essentiellement du chêne et du pin) des forêts de Haguenau, Dabo, Bitche, Waldeck ou encore Sturzelbronn (JEHIN, 2006).

En 1701, le duc Léopold établit un règlement général, s'inspirant de l'ordonnance de Colbert, promulguée en 1669 dans le Royaume de France (afin de réaffirmer l'autorité de Louis XIV sur les forêts royales) (GARNIER, 2004 ; JEHIN, 2005). Ce règlement cherche à unifier tout en conservant les traditions régionales. À cette époque, les forêts du Duché appartiennent au duc de Lorraine et à quelques seigneurs et sont gérées par le biais des gruyers (officier public en charge des forêts pour le compte d'un seigneur). Ce règlement interdit entre autres la pratique de la vaine pâture pour les paysans sans titre. En 1724, il interdit également les défrichements, sans autorisation, des terres regagnées par les forêts depuis cent ans et limite encore les droits d'usage. En 1747, le régime forestier des grueries (gérées par les gruyers) est supprimé dans l'administration forestière de Lorraine et est remplacée par les Maitrises des Eaux et Forêts, dont les officiers décrivent et cartographient les foresteries (JEHIN, 2006). À partir de 1762, les verreries doivent exploiter les forêts qui leur sont affectées en coupes à longue révolution (40 ou 50 ans) (JEHIN, 2005). Un arrêt de 1771 limite également le nombre de feux dans les communautés usagères des forêts de Bitche (DION, 1970).

À la Révolution (1789), avec la suppression de l'administration forestière, les forêts sont pillées et sortent de cette période dans un état déplorable (JEHIN, 2005). En 1820, de nombreux rapports font mention d'une forêt en souffrance et de nombreux phénomènes résultant du recul de l'arbre (érosion, glissement de terrain, inondation...). Afin de protéger et de rétablir l'espace forestier français, l'école forestière de Nancy est créée en 1824 et un nouveau code forestier est adopté en 1827.

Alors qu'en 1771, un arrêté royal préconise le traitement de la forêt en taillis sous futaie, la deuxième moitié du XIX^e siècle voit, avec la naissance de la sylviculture, le début de la conduite de la forêt en grandes futaies régulières de feuillus. C'est à partir de cette époque également que l'on commence à introduire et à planter largement des résineux comme le pin sylvestre ou l'épicéa. Dans les Vosges du Nord, c'est à partir de 1850 que ces deux résineux sont plantés,

surtout le pin sylvestre bien adapté aux sols pauvres. Le pin Weymouth et le sapin Douglas sont également implantés au cours du XIX^{ème} siècle (DUCHAMP, 2004).

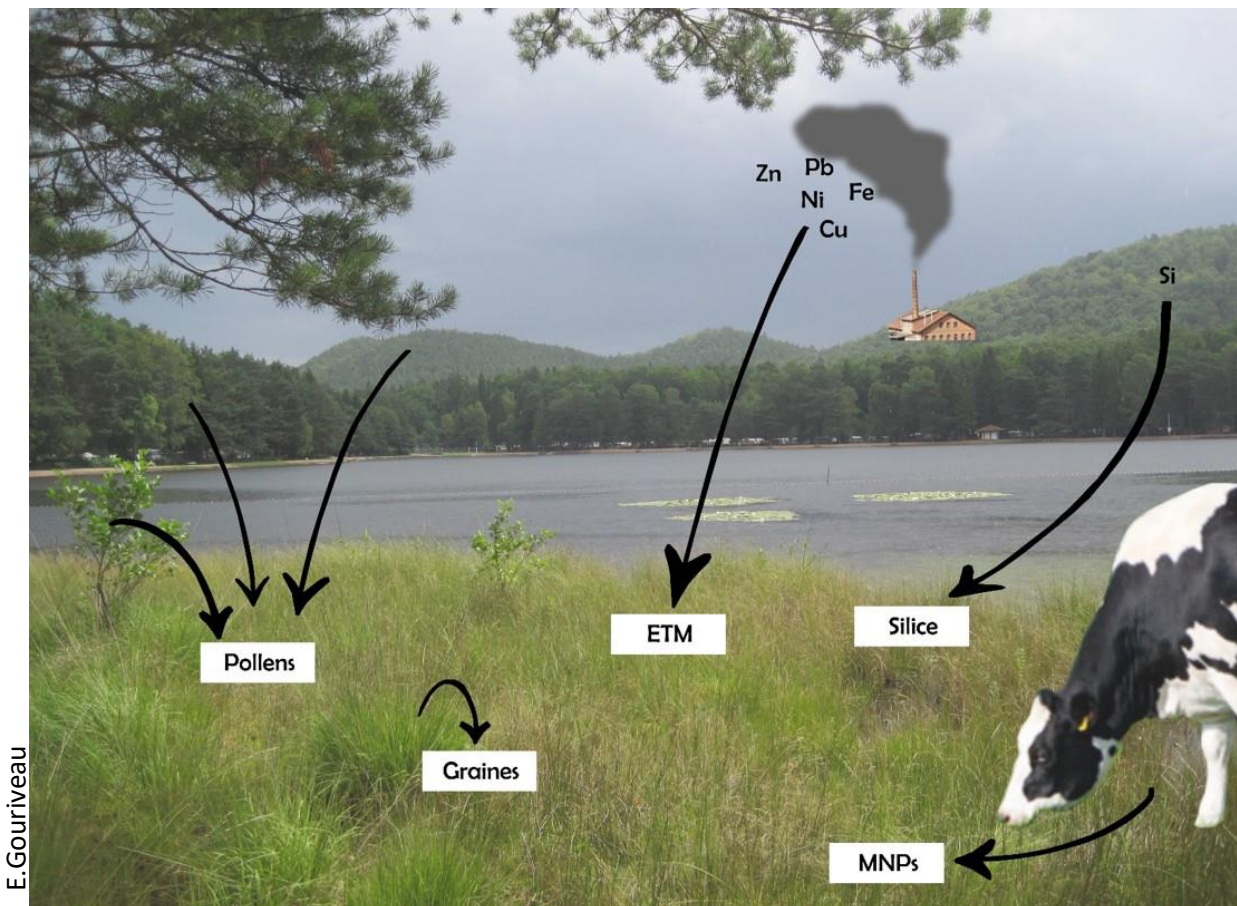
De nos jours, les forêts des Vosges du Nord sont gérées par l'ONF (créé en 1964) et font partie du Parc Naturel Régional des Vosges du Nord. Ainsi, les forêts des Vosges du Nord bénéficient de nombreux outils de protection de l'état boisé (plans d'aménagement forestier, conventions, ...). De plus, depuis les années 1950, le massif boisé des Vosges du Nord fait l'objet d'une forte déprise agricole. Les prairies de fonds de vallées ne sont plus entretenues, ni exploitées et sont laissées en friche.

La forêt a de nouveau changé de statut : elle est certes toujours perçue comme une ressource dans laquelle la production de bois perdure, mais elle est aussi perçue comme un lieu de loisir et son rôle dans la conservation de la biodiversité est de plus en plus reconnu.

Cet aperçu de l'histoire des Vosges du Nord et plus particulièrement du Pays de Bitche, et de leurs forêts montre à quel point la région s'avère intéressante pour l'étude des relations entre les populations humaines et leur environnement au cours des temps. Ces relations sont multiples, s'opèrent à différentes échelles, et sont probablement d'intensité variable au cours du temps, selon la démographie, le contexte historique et/ou technique. Les Vosges du Nord ont ainsi attiré les populations, depuis le chasseur-cueilleur paléolithique jusqu'au grand industriel. L'écosystème au cœur des activités dans cette région est l'espace forestier, tant du fait de son omniprésence que de la polyvalence du bois qu'il fournit.

Chapitre II.

Une approche multi-proxy



*Les tourbières comme archives naturelles :
présentation de quelques indicateurs analysés dans cette thèse*

Quatre sites ont été retenus pour notre étude et ont fait l'objet d'une analyse multi-proxy : palynologie, microfossiles non polliniques, micro-particules carbonisées, macro-particules carbonisées, sédimentologie, géochimie et datation radiocarbone.

II.1. Les prélèvements

Les remplissages étudiés ont fait l'objet de prélèvements réalisés manuellement au carottier russe de type GIK, par tronçons d'1 m de long et de 7,5 cm de diamètre (Figure II.1-1). Les sondages ont fait l'objet d'un double carottage dont un a été utilisé pour les analyses de pollens, des microfossiles non-polliniques, des micro-particules carbonisées et des sédiments, et l'autre pour effectuer les analyses des macro-particules carbonisées, réalisées par Vincent Robin (LIEC, UMR 7360, Université de Lorraine). Les quatre séquences seront présentées dans le chapitre suivant.



Figure II.1-1 : Photo d'un carottage au carottier russe et photo d'un sondage dans le carottier (cliché : E.Gouriveau)

II.2. Les analyses polliniques

II.2.1. Echantillonnage et préparations chimiques

Les prélèvements ont été échantillonnés pour l'analyse pollinique suivant un pas offrant une bonne résolution pour l'étude de l'évolution de la végétation et surtout l'étude des impacts humains au cours des trois derniers millénaires. Pour cela, un pas d'échantillonnage de 2 cm a été adopté pour l'étude des impacts humains au cours des trois derniers millénaires et de 4 cm pour les périodes plus anciennes.

Les échantillons ont été préparés selon la méthode classique de FAEGRI & IVERSEN (1989) :

- Décarbonatation à l'acide chlorhydrique (HCl 10%).
- Tamisage à 200 µm.
- Élimination de la matière organique à l'hydroxyde de sodium (NaOH 10%) à chaud.
- Destruction de la matière siliceuse à l'acide fluorhydrique (HF 40%) pendant 2 nuits.
- Acétolyse.

Avant l'étape de décarbonatation, 4 tablettes de spores de *Lycopodium* ont été ajoutées à l'échantillon. Chaque tablette (Batch 3862) contient environ 9 666 spores. Après préparation, les échantillons ont été conservés dans du glycérol.

II.2.2. Analyses polliniques

La lecture s'est faite au microscope optique à transmission (Leitz Laborlus S) au grossissement x312. Au moins 500 grains de pollen ont été identifiés et comptés par échantillons. Lorsqu'un ou plusieurs taxons (comme *Alnus*, *Betula*, *Pinus*, ou encore Cyperaceae) dominant le comptage pollinique, le nombre de grains de pollen comptabilisés peut être multiplié par 2 ou 3 pour atteindre une représentation d'au moins 200 pollens des autres taxons.

Tous les sites présentaient un matériel sporo-pollinique bien conservé et la plupart du temps abondant (avec une moyenne, tous sites confondus, de 607 719 pollens/gramme de sédiments). L'identification a été réalisée en utilisant la clé d'identification de FAEGRI & IVERSEN (1989), ainsi qu'avec l'aide des atlas photographiques (BEUG, 2004 ; REILLE, 1992) et de la collection de référence du Laboratoire Chrono-Environnement (UMR6249, Besançon).

L'identification du type *Cerealia* a été faite en utilisant des critères classiques de taille du grain de pollen et de diamètre de l'annulus. Dans notre étude, les tailles discriminantes utilisées ont été fixées à 40 µm pour le grain de pollen et à 10 µm pour l'annulus. Ces caractéristiques offrent un bon compromis entre les limites définies par BEUG (2004) avec une taille de grain supérieure à 37 µm et celles de JOLY *et al.* (2007), fixées à 47 µm pour le grain de pollen et 11 µm pour le diamètre de l'annulus. Les tailles retenues pour cette étude (40 µm et 10 µm) permettent d'éviter une trop importante sur-représentation des céréales (en utilisant la limite à 37 µm) mais également une trop forte sous-représentation (en utilisant la limite à 47 µm) et de comptabiliser en Poaceae sauvages certaines espèces produisant des pollens d'une taille comprise entre 38 et 40 µm de diamètre, comme par exemple *Glyceria fluitans* inféodé aux milieux humides (marais, fossés, rivières). Les pollens de *Cannabis* et d'*Humulus*, n'ont pas été différenciés et sont regroupés dans le groupe *Cannabis/Humulus*. De même, *Typha angustifolia* et *Sparganium* sont regroupés dans *Typha/Sparganium*.

II.2.3. Les indices d'anthropisation

Reconstituer les impacts des activités humaines passées nécessite de pouvoir repérer la présence humaine dans un lieu donné et à une période passée en recherchant dans les analyses polliniques des taxons appelés « indicateurs polliniques d'anthropisation » (IPA) (BEHRE, 1988, 1981). Plusieurs études ont cherché à définir ces indicateurs polliniques d'anthropisation dans des régions précises (BEHRE, 1981 ; BRUN, 2007 ; COURT-PICON, 2007 ; MIRAS, 2004). Ces différentes études ont analysé la pluie pollinique actuelle afin de repérer les bons indicateurs polliniques permettant d'identifier un type précis de pratiques humaines, telles que les cultures de céréales, les pâturages, les prairies fauchées ou encore les milieux piétinés. La relation entre végétation et pluie pollinique doit aussi être prise en compte afin de comprendre la représentation des taxons dans les enregistrements : sous- ou surreprésentation dues aux processus de production pollinique, présence locale ou régionale due aux modes de dispersion...

Certains types polliniques sont de nos jours considérés comme de bons indicateurs d'activités humaines et très fréquemment utilisés dans les analyses polliniques. C'est le cas par exemple des plantes cultivées (*Cerealia*-type, *Secale*-type par ex.), des messicoles (*Centaurea*

cyanus, *Papaver* par ex.) ou encore des plantes rudérales (*Artemisia*, Chenopodiaceae, *Plantago major/media* et Urticaceae par ex.).

Définir des indicateurs polliniques d'anthropisation présente cependant plusieurs difficultés :

- Tout d'abord, le niveau d'identification de la palynologie ne permet que rarement d'atteindre le rang de l'espèce. L'identification, surtout pour les herbacées, s'arrête souvent à la famille ou au genre. Or, au sein d'une même famille ou d'un même genre, des espèces peuvent avoir des écologies différentes. Ainsi de très bons indicateurs de milieux anthropiques ne peuvent pas être identifiés (BEHRE, 1981 ; FAEGRI & IVERSEN, 1989). Un exemple de cette limite est la capacité d'identification des différentes céréales : seuls le seigle et le maïs peuvent être différenciés du reste des céréales. Il en est de même pour l'identification de certaines plantes cultivées parmi les Fabacées. Ce problème d'identification concerne également les familles et genres pour lesquels certaines espèces sont liées à la présence humaine et d'autres sont inféodées au milieu de prélèvement (tourbière). Dans ce cas, il est particulièrement difficile de savoir si les variations enregistrées sont dues au développement d'activités humaines à proximité du site ou à l'évolution naturelle de la tourbière. De plus, certaines espèces peuvent avoir une amplitude écologique très large et donc pouvoir être présentes dans différents milieux liés à la présence de l'homme. Il est donc délicat d'attribuer une espèce à un groupe écologique particulier et de l'utiliser comme indicateur d'un type précis d'activité ou de pratique.
- Un deuxième point important est le rôle joué par les conditions climatiques et/ou édaphiques de la zone étudiée. En effet, la répartition des taxons indicateurs d'anthropisation n'est pas seulement induite par l'humain mais aussi par le milieu et ses caractéristiques et contraintes (BEHRE, 1981). Ainsi certaines espèces sont absentes car les conditions du milieu d'étude ne permettent pas son développement et non parce qu'il n'y a pas d'activité humaine à proximité du site.
- Le repérage des indicateurs polliniques d'anthropisation est aussi soumis au processus de pollinisation (BEHRE, 1981 ; FAEGRI & IVERSEN, 1989). De nombreuses céréales et messicoles sont des espèces entomogames ou autogames, qui produisent donc peu de grains de pollen, très peu dispersés. Ces taxons sont ainsi très peu enregistrés dans les

séquences. Cependant, l'absence de leur pollen dans les enregistrements ne signifie donc pas l'absence de la plante dans le milieu. De même, les premiers pollens identifiés ne signifient pas forcément leur première apparition.

- Enfin, une difficulté supplémentaire est l'absence de référentiels actuels pour les agro-systèmes du passé (BEHRE, 1981). En effet, la distinction entre les terres destinées à l'agriculture (terre arable, champs) et celles destinées à l'élevage (pâturage, prés, prairie) est assez récente en Europe à l'échelle de l'histoire de l'agriculture (BEHRE, 1981). Les systèmes de cultures du passé ne sont pas toujours connus alors qu'ils impactent grandement la composition des cortèges floristiques. Les pratiques agro-pastorales bien documentées du Moyen Âge offrent la possibilité de s'approcher des pratiques préhistoriques, telle que la pratique de l'agriculture sur brûlis (BEHRE, 1988).

Il est donc important de discuter les courbes des différents IPA à la lumière les unes des autres et si possible de les comparer à d'autres marqueurs tels que les microfossiles-non-polliniques.

Aucune étude de pluie pollinique actuelle n'a été réalisée dans les Vosges ou dans les Vosges du Nord afin d'identifier les IPA pouvant être utilisés de manière fiable. Seules deux études de transects de végétation actuelle ont été menées dans les Vosges cristallines (JANSSEN & BRABER, 1987 ; TAMBOER-VAN DEN HEUVEL & JANSSEN, 1976). Ces deux études n'abordent que très succinctement les indices d'anthropisation. Or, sans référentiel régional, l'attribution d'un type pollinique à un type d'activités humaines précis est délicat.

Les indices polliniques d'anthropisation retenus dans cette étude sont regroupés en 3 types différents :

- les plantes cultivées (*Cerealia*-type³, *Secale*-type, *Fagopyrum*, *Cannabis/Humulus*) indiquant une activité agricole à proximité du lieu de prélèvement ;
- les plantes messicoles (*Centaurea cyanus*, *Papaver*) indiquant la présence de champs ;
- les indicateurs rudéraux, nitrophiles, de piétinement et/ou pastoraux (*Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Anthemideae*, *Convolvulus*, *Mercurialis*, *Centaurea jacea/nigra*, *Centaurea scabiosa*, *Cichorioideae*, *Dipsacaceae*, *Plantago lanceolata*, *Rumex*, *Sanguisorba minor*, *Plantago major/media*, *Polygonum aviculare*, *Polygonum persicaria*, *Solanum nigrum*, *Urticaceae*) indiquant une fréquentation humaine ou

³ Les correspondances nom latin/nom vernaculaire de tous les taxons polliniques sont présentés en annexe 1.

animale, ainsi que la présence de pâturages, de prés, de prairies, et/ou de milieux fauchés.

II.2.4. Représentations des résultats

Les résultats des analyses polliniques sont présentés sous la forme classique de diagrammes polliniques tracés avec le logiciel Tilia (GRIMM, 1991). Des zones d'assemblage pollinique local ont été délimitées selon l'analyse de cluster CONISS (GRIMM, 1987).

Les quatre sites analysés sont des structures de petites tailles et à bassin versant restreint qui vont enregistrer en majorité la pluie pollinique locale à micro-régionale. En effet, des études empiriques et des simulations ont démontré que plus la taille du bassin versant est restreinte, plus les assemblages polliniques reflètent la végétation locale (CALCOTE, 1998, 1995 ; JACKSON, 1990 ; SUGITA, 1994). La comparaison des quatre remplissages permettra d'interpréter et de distinguer les assemblages polliniques de la végétation locale de ceux intervenant dans la dynamique régionale.

Pour s'affranchir de la végétation locale dominante, et ainsi mieux percevoir les variations de la végétation régionale, deux types de diagrammes sont construits :

- des diagrammes représentant la végétation régionale pour lesquels les pourcentages relatifs, calculés avec le logiciel Tilia, sont basés sur la somme pollinique totale à laquelle ont été retirés tous les taxons inféodés au milieu de prélèvement (à savoir : *Alnus*, *Betula*, *Salix*, *Frangula*, les taxons mésohygrophiles, aquatiques, liés aux milieux tourbeux, Cyperaceae, les sphaignes) ainsi que les spores monolètes⁴ et trilètes; ces taxons sont alors présentés en nombre de pollens comptés.
- des diagrammes représentant la végétation locale, poussant sur ou au bord de la tourbière ; les pourcentages relatifs des taxons représentés sur ces diagrammes sont calculés sur la somme pollinique totale de laquelle seules les spores monolètes et trilètes ont été exclues (présentées en nombre de pollens comptés) ; les taxons inféodés au milieu de prélèvement ont été regroupés par affinité écologique, à savoir :

⁴ Les spores sont séparées en deux groupes morphologiques en fonction de la forme de la fente de germination : soit simple (monolète : *Athyrium*, *Dryopteris*...), soit à trois branches (trilète : *Pteridium*, *Osmunda*, *Sphagnum*...)

- les « arbres et arbustes inféodés » : *Alnus*, *Betula*, *Salix*, *Frangula*
- les taxons mésohygrophiles : *Apiaceae*, *Filipendula*, *Lythrum*, *Lysimachia*, *Ranunculaceae*, *Equisetum*
- les taxons aquatiques : *Alisma*, *Callitricha*, *Lemna*, *Myriophyllum*, *Nymphaea*, *Nuphar*, *Potamogeton*, *Typha/Sparganium*, *Typha latifolia*, *Utricularia vulgaris*
- les taxons liés au milieu tourbeux : *Drosera*, *Hydrocotyle*, *Menyanthes trifoliata*, *Sphagnum*
- les Cyperaceae sont présentées seules.

Enfin, les résultats peuvent également être présentés en concentration (nombre de pollen par gramme de sédiment). La présentation de ces diagrammes permet de mettre en évidence d'éventuel biais dû au calcul de pourcentages relatifs et/ou des problèmes de conservation différentiel du matériel pollinique ou de l'accumulation du sédiment au cours du temps.

II.3. Les spores de champignons et les algues

II.3.1. Généralités sur les « microfossiles non-polliniques »

« Microfossiles non-polliniques » (MNP) est le terme utilisé pour caractériser les microfossiles autres que les grains de pollen et les spores de Ptéridophytes et de Bryophytes (CUGNY, 2011 ; VAN GEEL, 2001). Ils regroupent les spores de champignons, les restes d'algues, les cyanobactéries et les restes d'invertébrés.

L'étude des MNP accompagne couramment les analyses polliniques. Cela est dû d'une part essentiellement aux similarités dans l'analyse des deux types de microfossiles qui se conservent au cours du temps dans les mêmes milieux et qui résistent au même protocole de préparation chimique. En effet, les restes fongiques possèdent une paroi épaisse en chitine qui leur confère une grande résistance. De plus, les MNP apportent des informations complémentaires de celles obtenues via les données polliniques :

- Les MNP sont considérés comme des indicateurs « locaux ». Leur dispersion se fait sur de faibles distances autour de leur point de production (CUGNY, 2011 ; VAN GEEL, 2001 ; VAN GEEL & APTROOT, 2006). Cependant, il faut rester vigilant au possible apport de MNP lors des phases d'érosion qui transportent les MNP liés aux particules minérales (DOYEN

& ETIENNE, 2017). Mais même par ces processus, les MNP ne sont enregistrés qu'à l'échelle du bassin versant.

- La grande diversité des MNP, grâce à leur exigence écologique apportent des informations variées sur le milieu dans le lequel le prélèvement a été effectué. Ces informations peuvent porter aussi bien sur des conditions écologiques (niveau d'eau par ex.), sur la présence d'un taxon végétal (*Carex*, *Sphagnum*), sur la présence de bois en décomposition ou encore sur la présence de déjections d'herbivores. Ces informations peuvent compléter, préciser et/ou supporter les données palynologiques.

Dans notre étude, nous n'avons choisi que des MNP bien identifiables et à l'écologie bien définie pour apporter des informations utiles dans la reconstitution des environnements passés : des champignons coprophiles, des spores de champignons parasites, des spores de champignons saprophytes ou carbonicoles, des spores de champignons caractéristiques de conditions écologiques précises ou encore des algues.

II.3.2. Les spores de champignons coprophiles (SCC)

Les champignons coprophiles poussent sur les excréments animaux ou humains. L'identification de leurs spores dans les sédiments indique la présence d'herbivores sauvages et/ou domestiques à proximité du site de prélèvement (CUGNY *et al.*, 2010 ; DAVIS, 1987 ; DAVIS & SHAFER, 2006 ; DOYEN & ETIENNE, 2017 ; ETIENNE & JOUFFROY-BAPICOT, 2014 ; VAN GEEL & APTROOT, 2006). Les types considérés comme de bons indicateurs de présence d'herbivores et largement utilisés comme des indicateurs de présence de bétail et d'activités pastorales sont *Sporormiella*-type, *Podospora*-type, *Sordaria*-type et *Cercophora*-type (Figure II.3-1). Ces champignons sont soit exclusivement coprophiles, soit coprophiles/saprophytes.

- HdV-55 – *Sordaria*-type (Figure II.3-1a)

Sordaria est un genre constitué principalement d'espèces coprophiles, considéré comme un indicateur fiable de la présence d'herbivores domestiques et de pâtures (CUGNY *et al.*, 2010 ; VAN GEEL & APTROOT, 2006).

- HdV-112 – *Cercophora*-type (Figure II.3-1b)

Cercophora est un genre constitué d'espèces coprophiles et d'espèces saprophytes, poussant sur le bois en décomposition ou sur les tiges et feuilles d'herbacées (CUGNY, 2011 ;

VAN GEEL, 2001). Il est cependant couramment utilisé comme indicateur de la présence locale d'excréments animaux (VAN GEEL & APTROOT, 2006). En revanche, comme *Cercophora* contient également des espèces saprophytes, nous interpréterons la présence de ses spores comme marqueur de la présence de bétail uniquement lorsqu'un autre indicateur fiable de présence d'herbivore sera également identifié, comme *Sordaria*, *Sporormiella*, ou *Podospora*.

- HdV-113 – *Sporormiella*-type (Figure II.3-1c)

Sporormiella est un genre de champignon strictement coprophile poussant sur les excréments d'herbivores sauvages et domestiques (mouton, vache, chèvre, cheval...) (DAVIS, 1987 ; DOYEN & ETIENNE, 2017). Ce type est considéré comme un indicateur fiable de la présence d'herbivores domestiques et de pâtures (CUGNY *et al.*, 2010). De plus, des études tendent à montrer une relation entre l'intensité du signal des spores de *Sporormiella* et la densité d'herbivores à proximité du site de prélèvement (DAVIS, 1987 ; DAVIS & SHAFER, 2006 ; VAN GEEL, 2001).

- HdV-368 - *Podospora*-type (Figure II.3-1d)

Podospora est un genre composé principalement d'espèces coprophiles, poussant sur les déjections d'humains ou d'herbivores (CUGNY, 2011 ; VAN GEEL, 2001). Comme *Sporormiella*, il est considéré comme un indicateur fiable de la présence d'herbivores domestiques et de pâtures (CUGNY *et al.*, 2010).

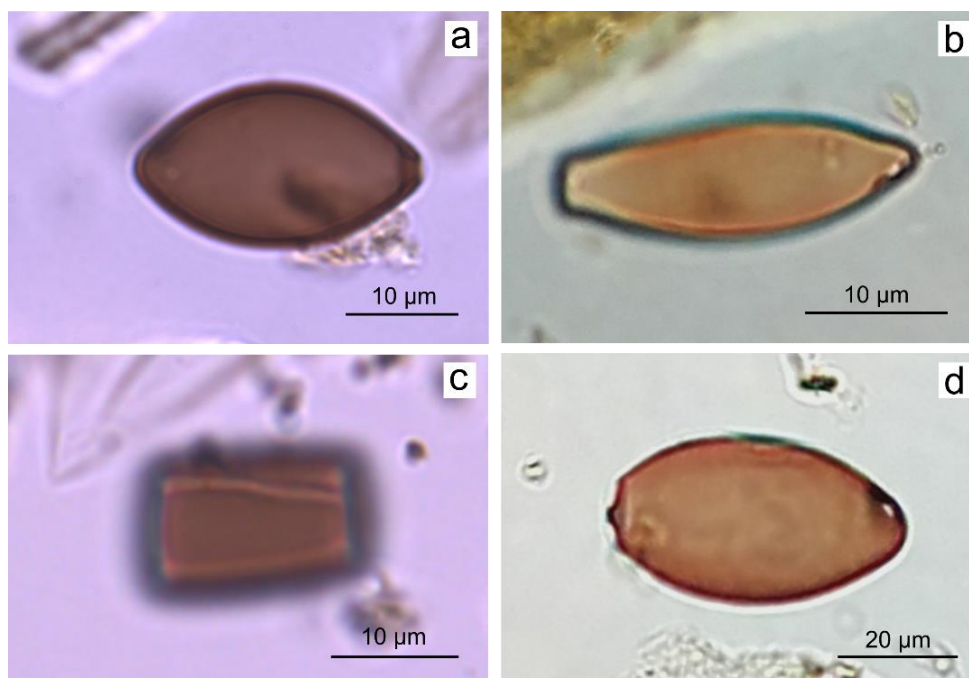


Figure II.3-1 : Photographies au microscope optique des spores de champignons coprophiles. a : *Sordaria*-type, b : *Cercophora*-type, c : *Sporormiella*-type, d : *Podospora*-type

II.3.3. Les autres spores de champignons

- HdV 1-2 – *Gelasinospora*

Gelasinospora est fimicole, carbonicole et lignicole. Ses spores sont abondantes dans la tourbe fortement décomposée, formée sous des conditions relativement sèches et oligotrophes (VAN GEEL & APTROOT, 2006). Elles atteignent leur maximum dans des couches riches en charbons (VAN GEEL & APTROOT, 2006).

- HdV 13 – cf *Entophyctis lobata*

Les spores de ce type ressemblent à celles de *Entophyctis lobata* qui est une espèce aquatique et saprophyte (VAN GEEL, 1978). Ces spores sont présentes uniquement dans la partie ombrotrophe des tourbières et atteignent leur présence maximale dans la tourbe humide à *Sheuchzeria palustris*.

- HdV 16 – *Byssothecium circinans*

Ce champignon saprophyte se développe sous des conditions méso-, oligotrophes, pas trop humides et souvent dans des niveaux riches en *Molinia* (CUGNY, 2011 ; VAN GEEL & APTROOT, 2006).

- HdV 18

Le type HdV 18 est retrouvé sur *Eriophorum vaginatum*.

- HdV 27 – *Tilletia sphagnii*

Tilletia est un parasite de *Sphagnum*, contenu dans les capsules avec les spores (VAN GEEL, 1978).

- HdV 44 – *Kretzschmaria deusta*

K. deusta est un champignon parasite d'arbre, très fréquent sur le hêtre mais également présent sur d'autres feuillus et conifères (DOYEN & ETIENNE, 2017 ; VAN GEEL & APTROOT, 2006). Il se développe par exemple sur *Abies*, *Acer*, *Aesculus*, *Alnus*, *Betula*, *Carpinus*, *Castanea*, *Fraxinus*, *Populus*, *Quercus*, *Salix*, *Taxus*, *Tilia* et *Ulmus*. Il est considéré comme un indicateur de la proximité du couvert végétal (DOYEN & ETIENNE, 2017).

- HdV 124 – cf. *Persiciospora* sp.

Le type HdV 124 semble associé aux tourbières mésotrophes (VAN GEEL & APTROOT, 2006). Dans l'étude de Cugny (2011), les spores de ce type atteignent leur maximum dans une tourbière à Cyperaceae intensivement pâturée.

- HdV 126 – *Clasterosporium caricinum*

Clasterosporium caricinum est un champignon parasite de *Carex paniculata* et de *C. pseudocyperus* (CUGNY, 2011 ; VAN GEEL, 2001 ; VAN GEEL & APTROOT, 2006).

- HdV 140 – *Valsaria*

Ce champignon est présent dans les milieux tourbeux formés sous des conditions humides et eutrophes (VAN GEEL *et al.*, 2003 ; VAN GEEL & APTROOT, 2006).

- HdV 172 – *Coniochaeta lignaria*

Ce champignon pousse sur les déjections et sur le bois (CUGNY *et al.*, 2010 ; VAN GEEL & APTROOT, 2006).

- HdV 200

Les spores de ce type semble se développer sur des végétaux héliophytes en décomposition et indiquer des phases d'assèchement temporaires faisant suite à des phases aquatiques (CUGNY, 2011).

- HdV 360 – cf. *Brachysporium* sp.

Brachysporium est un champignon saprophyte lignophage (JOUFFROY-BAPICOT, 2010).

- TM 4009

D'après CUGNY *et al.* (2011), ce microfossile hyalin se développerait préférentiellement dans une végétation dominée par des pelouses humides à marécageuses, à *Carex nigra*. Dans les assemblages de cette étude, il attesterait également de l'augmentation de l'état trophique engendrée par une présence pastorale.

- *Entorrhiza*

Cugny (2011) identifie *Entorrhiza* dans quelques zones humides.

II.3.4. Les algues

- HdV 61 – *Mougeotia*

Il s'agit de la zygospore de l'algue verte du genre *Mougeotia* qui indique une augmentation de l'humidité (JOUFFROY-BAPICOT, 2010). Comme *Zygnema*, elle se développe dans les eaux riches en oxygène, dans les zones stagnantes, au fond de lac, d'étang ou de petite étendue d'eau ainsi que dans les sols humides (JOUFFROY-BAPICOT, 2010 ; VAN GEEL, 2001).

- HdV 62 – *Zygnema*

Il s'agit de la zygospore de l'algue verte d'eau douce du genre *Zygnema*. Elle se développe dans les eaux riches en oxygène, dans les zones stagnantes, au fond de lac, d'étang ou de petite étendue d'eau ainsi que dans les sols humides (JOUFFROY-BAPICOT, 2010 ; VAN GEEL, 2001).

II.3.5. Préparation, comptages et représentations

L'analyse des microfossiles non-pollinique est réalisée sur les mêmes lames que celles utilisées pour les comptages palynologiques. Les microfossiles ont été identifiés et comptés en même temps que l'identification et le comptage des grains de pollen. Lorsque la limite des 500 grains de pollen minimum en deux lignes a été atteinte, le comptage des MNP s'arrêtait également, indépendamment du nombre atteint.

Les résultats des analyses de MNP sont présentés dans des diagrammes (réalisés sur le logiciel Tilia), où les spores sont exprimées en concentration (nombre de spores par gramme de sédiment).

II.4. Les particules carbonisées

II.4.1. Reconstituer l'histoire des feux

Le comptage des charbons est couramment utilisé afin de reconstituer l'histoire des feux (CONEDERA *et al.*, 2009 ; FINSINGER & TINNER, 2005 ; PATTERSON *et al.*, 1987 ; TINNER & HU, 2003). Les charbons, en tant que particules amorphes de carbone inorganique, se conservent bien et se retrouvent dans les lacs, les tourbières ou encore dans le sol.

Les charbons sont transportés soit par le vent, soit par l'eau (ruissellement) et sont dispersés depuis leur zone de production de manière différentielle selon leur taille et leur rapport volume/surface. Plus une particule est de taille importante, plus elle est d'origine locale (à l'échelle du bassin versant), et inversement, plus une particule est petite et légère, plus elle est dispersée sur de longues distances. Ainsi, les charbons peuvent être divisés en deux grandes catégories en fonction de leur taille :

- Les micro-charbons correspondent aux plus petites particules, habituellement estimées entre 10 et 200 μm et identifiées sur les lames de palynologie (CLARK, 1984 ; CONEDERA

et al., 2009 ; MOONEY & TINNER, 2011 ; PATTERSON *et al.*, 1987 ; TINNER & HU, 2003). Ces particules peuvent être transportées sur de longues distances et leur origine est donc considérée comme étant principalement régionale à extra-régionale (20-100 km) (CONEDERA *et al.*, 2009 ; MOONEY & TINNER, 2011 ; TINNER & HU, 2003). Mais lors d'un incendie ces particules se déposent également se déposer localement et elles reflètent alors un évènement de feu local (MOONEY & TINNER, 2011). Plusieurs études ont montré une corrélation significative entre les régions d'origine des micro-charbons et des pollens (PATTERSON *et al.*, 1987 ; TINNER & HU, 2003). L'origine du signal pollinique peut donc être utilisé pour différencier les charbons d'origine locale de ceux d'origine régionale (PATTERSON *et al.*, 1987).

- Les macro-charbons sont les particules plus grosses, d'une taille généralement supérieure à 100-200 μm et sont isolées par le tamisage (CONEDERA *et al.*, 2009 ; GARDNER & WHITLOCK, 2016 ; MOONEY & TINNER, 2011). Ces particules sont beaucoup moins dispersées que les micro-charbons et reflètent donc plutôt des évènements de feux locaux.

La quantification de ces particules, issues de la combustion incomplète des végétaux, dépend de nombreux facteurs tels que l'intensité des feux, les processus taphonomiques (dispersion, dépôt, conservation), la taille du bassin collecteur analysé ou encore la taille des particules analysées, qui rendent leur interprétation en terme de reconstitution de l'activité des feux difficile (CONEDERA *et al.*, 2009 ; MOONEY & TINNER, 2011 ; PATTERSON *et al.*, 1987). Cependant, croiser les deux approches et les deux types de particules permet d'appréhender, au moins qualitativement, l'histoire passée des feux et, par comparaison avec les analyses polliniques, permet de discuter des pratiques de gestion de l'environnement.

II.4.2. Micro-particules carbonisées : Préparation, identification, comptages et représentations

Nous avons utilisé la méthode de comptage des particules carbonisées sur les lames réalisées pour les analyses polliniques (FINSINGER & TINNER, 2005 ; TINNER & HU, 2003). Une étude de l'impact sur les charbons, du protocole de préparation des échantillons pour les analyses polliniques a montré que l'ensemble des étapes de préparations physiques et chimiques n'a pas d'impact significatif sur la surface ou le nombre des charbons (CLARK, 1984).

De même, comme tous les échantillons ont été préparés en suivant le même protocole, si celui-ci a un impact sur le nombre des particules, le même biais est présent pour tous les échantillons qui sont donc comparables.

Plutôt que de parler de « micro-charbons », nous parlerons ici de « micro-particules carbonisées » (μ PC), comme cela a été proposé par Clark (1984). En effet, l'identification des charbons dans les lames utilisées pour les analyses polliniques, est parfois rendue compliquée par les confusions possibles entre les charbons et toutes les autres particules noires présentes dans les sédiments (minéraux, restes d'insectes, fragments noirs de plantes, matière organique carbonisée...). Cependant, Clark (1984) a montré que les préparations polliniques permettent de supprimer la plupart des particules pouvant entraîner une confusion, exceptée la matière organique carbonisée qui se comporte comme les charbons. Les critères d'identification qui ont été adoptés dans cette étude sont ceux couramment utilisés : ont été comptées toutes les particules noires, opaques et anguleuses (Figure II.4-1) (FINSINGER & TINNER, 2005 ; PATTERSON *et al.*, 1987 ; TINNER & HU, 2003). Ainsi toutes les particules marrons ou présentant un contour marron n'ont pas été comptées.

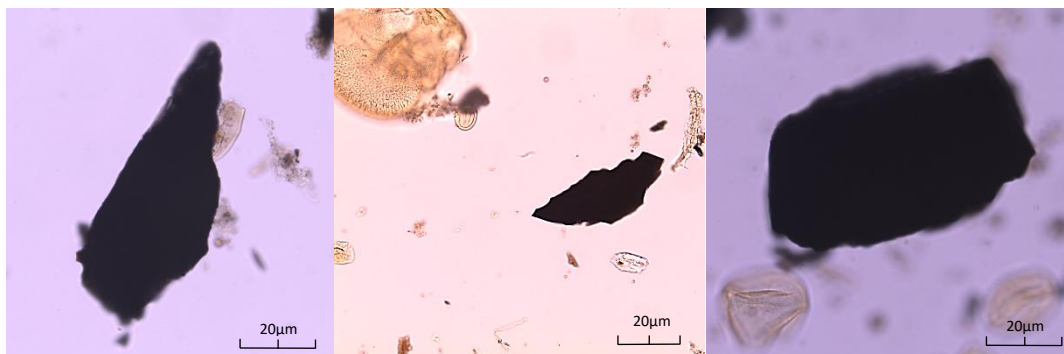


Figure II.4-1 : Photographies au microscope optique de microparticules carbonisées comptées dans nos échantillons polliniques

Comme il est admis que la surface totale de charbon dans une lame est fortement corrélée au nombre de fragments, les particules carbonisées ont simplement été comptées dans nos échantillons (MOONEY & TINNER, 2011 ; TINNER & HU, 2003). Afin de faciliter la lecture et le comptage des particules carbonisées très abondantes dans nos échantillons, la taille minimale de comptage habituellement fixée à 10 μ m a été montée à 22 μ m. Ainsi, les particules comptées ont une taille comprise entre 22 μ m et 200 μ m, correspondant à la maille de tamisage lors des préparations polliniques.

Les particules ont été comptées de la même manière que les MNP, à savoir, lorsque la limite des 500 pollens minimum en deux lignes a été atteinte, le comptage s'arrêtait indépendamment du nombre de particules atteint.

Les résultats des analyses sont présentés dans des diagrammes (réalisés sur le logiciel Tilia), où les particules sont exprimées en concentration (nombre de particules par gramme de sédiment).

II.4.3. Macro-particules carbonisées : Préparation, identification, comptages et représentations

Les macrocharbons, appelés par la suite macro-particules carbonisées (MPC) ont été analysés par V. Robin (LIEC). Ils sont isolés par tamisage de 2 ou 3 cm³ de sédiment, en continu tout au long des séquences. Les échantillons sont plongés dans 75 ml d'hypochlorite de sodium (13%) pendant au moins 24h avant d'être tamisés à 200 µm. Le refus de tamis (fraction > 200 µm) est trié afin d'isoler les fragments de charbons qui sont ensuite pris en photo, avec des paramètres identiques pour chaque photo. Afin de mesurer la surface cumulée de particules carbonisées par échantillon, les photos sont analysées numériquement avec le logiciel « Scion Image » (©ScionCorporation) (MOONEY & BLACK, 2003). La surface mesurée est ensuite rapportée au volume d'échantillonnage afin d'estimer la concentration en macro-particules pour chaque échantillon analysé (mm²/cm³; ROBIN *et al.*, 2012).

Ces valeurs sont alors analysées en utilisant le modèle âge-profondeur et le programme CharAnalysis 0.9, qui fournissent dans un premier temps le taux d'accumulation des macro-particules carbonisées en mm²/cm³/an (HIGUERA, 2009). Le programme permet ensuite la modélisation des enregistrements de charbons en estimant dans le signal de macrocharbons de bois interpolé (C_{int} en mm²/cm³/an), les tendances à faible fréquence constituant un bruit de fond du signal (*i.e.* C_{back} , 'background'). Cette composante de fond, correspondant aux changements de taux de formation du charbon, aux dépôts secondaires ou encore au mélange de sédiment, est estimée ici en utilisant le calcul d'une médiane mobile sur une fenêtre temporelle de 250 ans.

II.5. Les analyses carpologiques

Les carporestes retenus par le tamisage à 200 µm réalisé lors des préparations polliniques ont été identifiés (analyse : Caroline Schaal). Dans ce but, le refus de tamis (> 200 µm) a été trié sous loupe binoculaire afin d'en extraire les restes carpologiques qui ont été identifiés, sous loupe binoculaire au grossissement x2 à x60. L'identification a été effectuée à l'aide de nombreux atlas ainsi que par comparaison avec une collection carpologiques des graines actuelles et archéologiques (C. Schaal, GéoArchéon). La technique de comptage dit « au jugé » a été utilisée et consiste en une estimation d'un nombre minimum d'individu (NMI) basée sur l'association des fragments en fonction de leur taille, de leur morphologie et de leur éléments distinctifs pour reconstituer l'équivalent d'une semence (PRADAT, 2015).

II.6. Les analyses du sédiment : sédimentologie, géophysique et géochimie

II.6.1. Perte au feu

La teneur en matière organique des sédiments a été estimée par la méthode de la perte au feu. Cette méthode permet, grâce à des périodes de combustion à température et durée contrôlées, de mesurer la masse de matière organique brûlée dans un échantillon. La perte au feu a été réalisée avec un pas d'échantillonnage de 1 ou 2 cm d'après le protocole de HEIRI *et al.* (2001) :

- séchage des échantillons à l'étuve, à 40 °C pendant 24 h : la teneur en eau des échantillons n'a pas été estimée car les analyses ayant été réalisées 1 à 2 ans après les prélèvements, la conservation des carottes à l'horizontale et en chambre froide a modifié la teneur en eau pour un échantillon donné.
- broyage de l'échantillon à l'aide d'un mortier d'agate
- pesée de l'échantillon sec
- combustion au four à 500 °C pendant 4 h
- pesée des cendres restantes après combustion

Seule la première combustion permettant l'oxydation de la matière organique en dioxyde de carbone et en cendres a été réalisée. La deuxième combustion, permettant la destruction

des carbonates n'a pas été effectuée, car les terrains à l'affleurement dans les bassins versants ne contiennent aucun carbonate (grès rose des Vosges).

II.6.2. Mesure de la susceptibilité magnétique

La susceptibilité magnétique est la capacité d'un matériau à s'aimanter en réponse à un champ magnétique appliqué. Les mesures de susceptibilité magnétique ont été effectuées sur toutes les carottes à l'aide d'un banc de mesure géophysique multi-paramètre (multi-sensor core logger, Geotek). Les mesures ont été menées avec un pas de mesure de 0,5 cm. Les résultats sont présentés en S.I..

Mesurer la susceptibilité magnétique le long d'une carotte de sédiments permet d'observer les variations de la teneur en minéraux plus ou moins magnétiques (DENDIEVEL *et al.*, 2014 ; VANNIERE *et al.*, 2000). Ces minéraux peuvent être apportés dans les tourbières soit par transport atmosphérique (pollution, cendres, sables éoliens), soit par ruissellement (érosion du bassin versant...). Dans les bassins versants des tourbières étudiées, les minéraux les plus abondants sont le quartz et le feldspath qui constituent l'essentiel du grès roses des Vosges et sont des minéraux diamagnétiques⁵, et les argiles et les hydroxydes de fer qui sont des minéraux paramagnétiques⁶. Ces deux types de minéraux ont une susceptibilité très faible, qui peut même être négative pour les minéraux diamagnétiques.

II.6.3. Analyse géochimique

II.6.3.1. La fluorescence des rayons X (XRF)

La teneur relative des principaux éléments chimiques présents dans les sédiments tourbeux a été mesurée par fluorescence des rayons X à la surface des carottes sur un Avaatech Core Scanner (Laboratoire EDYTEM, CNRS-Université Savoie Mont-Blanc). Afin d'éviter toute contamination, la surface de la carotte a été recouverte d'un film d'Ultralene ultra-fin (4 µm). Les mesures ont été réalisées tous les 0,5 cm avec un voltage de 10kV et une intensité de 0,10-0,15 mA pour détecter Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Rh. Un voltage de 30 kV et une

⁵ Se dit d'un minéral qui prend une aimantation plus faible et en sens inverse au champ magnétique auquel il est soumis.

⁶ Se dit d'un minéral qui s'aimante dans le même sens que le champ magnétique auquel il est soumis, mais plus faible.

intensité entre 0,12 et 0,2 ont été utilisés pour les éléments plus lourds que sont Mn, Fe, Cu, Zn, Ni, Br, Rb, Sr, Zr, Pb. Les teneurs relatives des différents éléments sont données en coups par seconde (cps).

II.6.3.2. Reconstituer l'histoire des pollutions métalliques

Parmi les éléments mesurés par XRF, les éléments métalliques sont utilisés pour repérer des phases de pollutions liées aux activités minières et métallurgiques (DE VLEESCHOUWER *et al.*, 2009). En effet, parmi les différentes étapes de la métallurgie, la réduction du minerai et sa transformation rejettent dans l'atmosphère une pollution métallique sous forme de particules fines qui peuvent, en fonction de leur taille, être transportées sur de très longues distances (ARNAUD, 2003 ; JOUFFROY-BAPICOT, 2007). Ces particules se déposent sur le sol, notamment dans les tourbières qui s'avèrent être des pièges pour certains éléments chimiques métalliques, tels que le nickel, le cuivre, le zinc et le plomb (DE VLEESCHOUWER *et al.*, 2009 ; LE ROUX, 2005 ; SHOTYK, 1988).

Ces quatre éléments font partie des principaux polluants métalliques liés aux activités humaines détectées dans les tourbières (SHOTYK, 1988). Leur origine anthropique varie. Le plomb est par exemple présent dans de nombreux minerais exploités par l'homme (cuivre, or, argent, étain) (FOREL *et al.*, 2010 ; JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007). Leur extraction et transformation émettent des particules enrichies en plomb dans l'atmosphère, tout comme la combustion des énergies fossiles, d'autant plus que le plomb a été utilisé comme additif dans l'essence. Il est donc très utilisé pour tracer les activités industrielles, y compris celles qui sont les plus anciennes (ARNAUD, 2003 ; DE VLEESCHOUWER *et al.*, 2010), notamment via leur enregistrement dans la tourbe puisque le plomb est considéré comme immobile et non remobilisé dans les tourbières ombrotrophes et minérotrophes, grâce à son affinité pour la matière organique (BREITENLECHNER *et al.*, 2010 ; DE VLEESCHOUWER *et al.*, 2009 ; FOREL *et al.*, 2010 ; JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007 ; VON SCHEFFER *et al.*, 2019). Le comportement des trois autres éléments métalliques dans la tourbe est moins bien connu, ce qui nécessite de toujours comparer leur courbe à celle du plomb (DE VLEESCHOUWER *et al.*, 2009). Ainsi, le zinc semble lessivé sous la surface vivante de la tourbière alors que l'immobilité du cuivre et du nickel dans la tourbe n'a jamais été clairement démontrée (DE VLEESCHOUWER *et al.*, 2009 ; SHOTYK, 1988). De plus, dans le cas du nickel, il est nécessaire de comparer sa courbe aux résultats de la perte

au feu afin de s'assurer que les variations perçues sont bien le résultat d'une pollution et non d'un apport de matière minérale issue du bassin versant (SHOTYK, 1988). Malgré tout, ces éléments apportent des preuves supplémentaires de potentielles pollutions métalliques car le zinc est très souvent associé au plomb dans les minerais et que l'apport anthropique du cuivre est supérieur à sa présence naturelle dans les tourbières (DE VLEESCHOUWER *et al.*, 2009).

Le fer est également un métal présent dans les tourbières mais bien qu'il puisse être issu d'activités humaines, son apport dans les tourbières résulte essentiellement de processus naturels et notamment au fonctionnement de la tourbière et à sa végétation de surface (SHOTYK, 1988).

Pour distinguer les apports locaux, liés à l'érosion physique et chimique des roches du bassin versant, des apports atmosphériques, il convient de normaliser les teneurs des éléments métalliques par rapport à un élément réputé immobile, ou au moins très peu mobile, dans la tourbe. Compte-tenu de la nature des roches du bassin versant et d'études antérieures, nous avons choisi de normaliser nos données avec le titane, qui est exclusivement issu des phénomènes d'érosion du sol et qui est considéré constant dans la fraction détritique (ARNAUD, 2003 ; DE VLEESCHOUWER *et al.*, 2010).

L'étude des rapports élément métallique/Ti dans nos séquences permet ainsi d'identifier des phases d'apport de pollution d'origine anthropique et donc de repérer une activité de métallurgie ancienne, complétant ainsi les connaissances sur ces activités pré-industrielles en l'absence de données archéologiques (DE VLEESCHOUWER *et al.*, 2010 ; FOREL *et al.*, 2010 ; JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007 ; MIGHALL *et al.*, 2017, 2002).

II.7. Les datations

II.7.1. Datations radiocarbone AMS

Les trois séquences ont été datées par la méthode de datation radiocarbone par spectrométrie de masse par accélérateur (AMS) afin d'établir des modèles âge-profondeur. Les échantillons envoyés sont soit des restes végétaux isolés par tri manuel (graines, fragments de bois, charbons), soit du sédiment total pour les échantillons dans lesquels le taux de matière organique était très faible.

Les calibrations ont été réalisées avec le logiciel en ligne OxCal 4.3 (BRONK RAMSEY, 2009), qui utilise la courbe de calibration IntCal13 (REIMER *et al.*, 2013).

Les modèles âge-profondeur ont été réalisés avec le package « clam » du logiciel R (BLAAUW, 2010) et en utilisant soit un modèle « smooth spline », soit un modèle d'interpolation linéaire. Les taux d'accumulation ont également été calculés par le package « clam ». Les dates sont exprimées en format calibré avant 1950 (cal.BP) ou en cal. BC/AD (av.JC/ap.JC).

II.7.2. Datations au Pb210

Une datation au ^{210}Pb a été effectuée sur les sites de KOH et de HOR. Des échantillons ont été prélevés tous les centimètres pour les 19 premiers centimètres de HOR et tous les 2 cm pour les 30 premiers centimètres de KOH. Ils ont été séchés totalement à l'étuve à 40°C puis broyés grossièrement au mortier en agate. Un sous-échantillon de poids connu a ensuite été celé dans des tubes standardisés.

Au bout de 20 jours, une fois l'équilibre séculaire $^{226}\text{Ra}/^{210}\text{Pb}$ atteint, la mesure a été réalisée au laboratoire souterrain de Modane, par spectrométrie gamma, avec un détecteur Germanium (GeHP). Les activités en ^{210}Pb , ^{241}Am et ^{137}Cs ont été mesurées.

Malheureusement, un retard dans la réception des résultats des mesures de ^{210}Pb de certains échantillons n'a pas laissé suffisamment de temps pour intégrer ces données dans les modèles âge-profondeur.

En revanche, deux pics bien distincts de ^{137}Cs ont été identifiés et correspondent pour l'un à l'intensité maximale des tests atmosphériques des armes nucléaires en 1963, pour l'autre à l'accident nucléaire de Tchernobyl en 1986 (KREISER *et al.*, 1992). Ces deux dates ont été utilisées pour contraindre le sommet des modèles âge-profondeur.

II.8. Les analyses de raréfaction

Des analyses de raréfaction ont été réalisées sur les données polliniques des trois sites en utilisant le logiciel Past (HAMMER *et al.*, 2001). Les taxons inclus dans l'analyse sont les mêmes que ceux de la somme pollinique (pour rappel, en sont exclus tous les taxons inféodés à la tourbière et les spores).

Cette méthode numérique donne une estimation de la richesse pollinique, correspondant au nombre de taxons polliniques attendus ($E(T_n)$) pour une même somme pollinique comptée (BIRKS & LINE, 1992). Elle standardise les comptages, permettant de s'affranchir du biais issu des sommes polliniques totales différentes d'un échantillon à l'autre et permet ainsi de comparer la richesse pollinique des échantillons. Dans nos sites, elle a donné une somme pollinique de base de 161 pour HOR et KOH et de 264 pour WAL.

La richesse pollinique estimée $E(T_n)$ peut être considérée comme une mesure approximative de la diversité floristique (diversité alpha) et donne des informations sur la structure du paysage (diversité gamma) (BERGLUND *et al.*, 2008 ; BIRKS & LINE, 1992 ; MIRAS *et al.*, 2015).

Chapitre III.

Les sites étudiés



E. Gouriveau

Etang-tourbière de Waldeck

Ce chapitre présente les sites étudiés, qui sont quatre zones humides, localisées dans le Pays de Bitche (Figure III-1).

La localisation et l'histoire de ces sites les placent dans une dynamique intéressante pour l'étude des interactions entre l'homme et son environnement. Les résultats des analyses présentées au chapitre précédent seront également présentés ici.

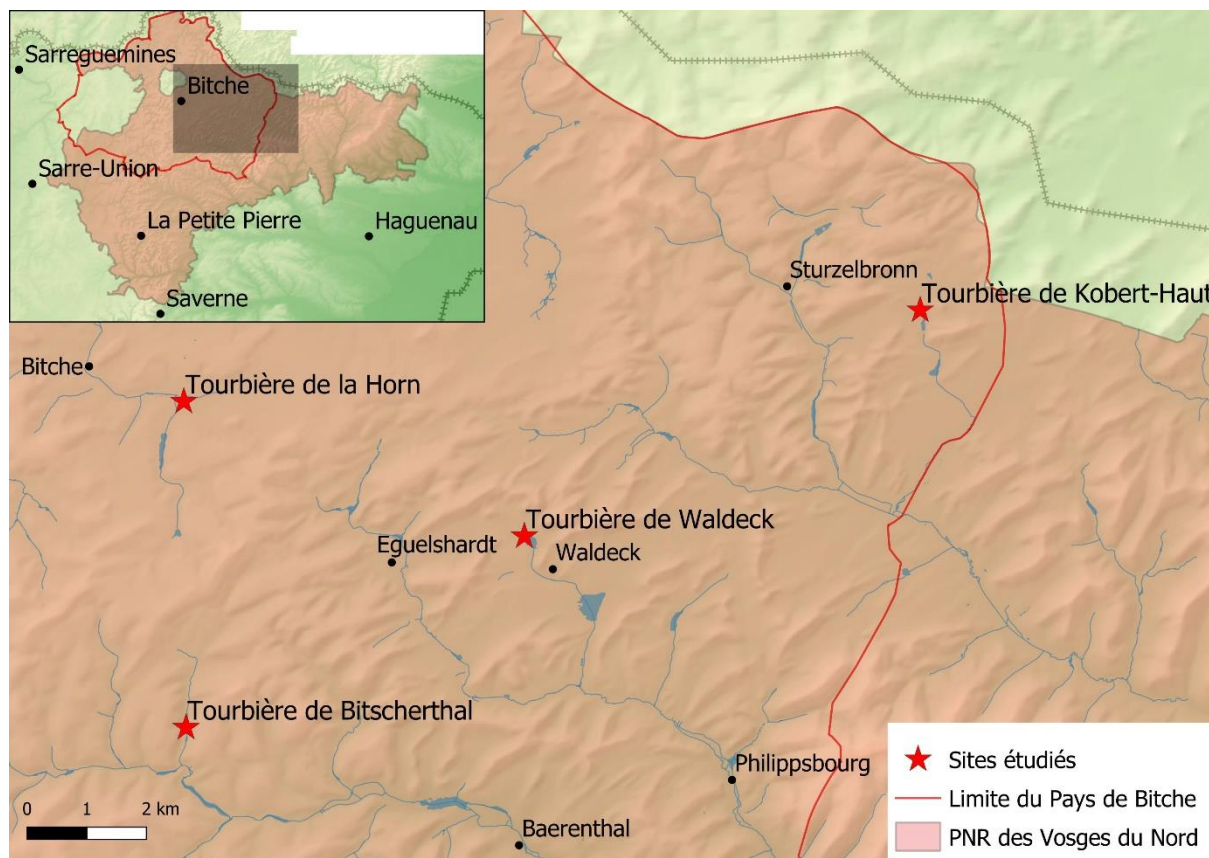


Figure III.1 : Localisation des sites étudiés dans le Pays de Bitche (source : BD ALTI2 ©IGN)

Par souci de clarté, les résultats des analyses effectuées seront présentés par sites. Après avoir décrit dans un premier temps la localisation de la tourbière et sa végétation actuelle, nous aborderons le contexte historique propre à chaque site, ainsi que la description de la séquence et sa chronologie. Les diagrammes présentant les résultats bruts et complets pour chaque site sont présentés en annexe (annexes 2 à 14). Dans cette partie, les résultats des analyses menées seront présentés en diagrammes simplifiés puis décrits par zones d'assemblage pollinique locale (LPAZ), en commençant, pour chaque zone, par les résultats des analyses polliniques concernant la végétation régionale, puis la végétation locale, les résultats de l'étude des microfossiles non-polliniques (MNP) et des particules carbonisées (μ PC et MPC), et enfin, les résultats des analyses du sédiment (perte au feu (PAF), susceptibilité magnétique (SM), la

fluorescence des rayons X (XRF)). Les résultats marquants pour chaque séquence seront résumés dans deux tableaux : un premier concernant les marqueurs avec un enregistrement extra-local à régional (pollens, μ PC, XRF), ainsi que les résultats de perte au feu et de susceptibilité magnétique ; un second avec les résultats des indices présentant un enregistrement local (pollens inféodés à la zone humide, MPC, graines).

III.1. La tourbière de la Horn (HOR)

III.1.1. Localisation et végétation actuelle

La tourbière de La Horn (Figure III.1-1) est localisée au sud de la ville de Bitche dans le département de la Moselle (49°02'41.9"N, 7°26'49.6"E, Figure III.1). Elle s'étend sur la rivière de La Horn, en aval de l'étang d'Hasselfurth, à une altitude de 287 m (Figure III.1-1.A). La surface de la tourbière est estimée autour de 8,8 ha. La surface du bassin versant alimentant la tourbière, délimité par SIG (QGIS outil SAGA), a été estimée à 865.4 ha et s'étend au sud et à l'est de la tourbière. Il est entièrement composé de Grès vosgien supérieur (t1c) (Figure I.1-5) (BLANALT *et al.*, 1967).

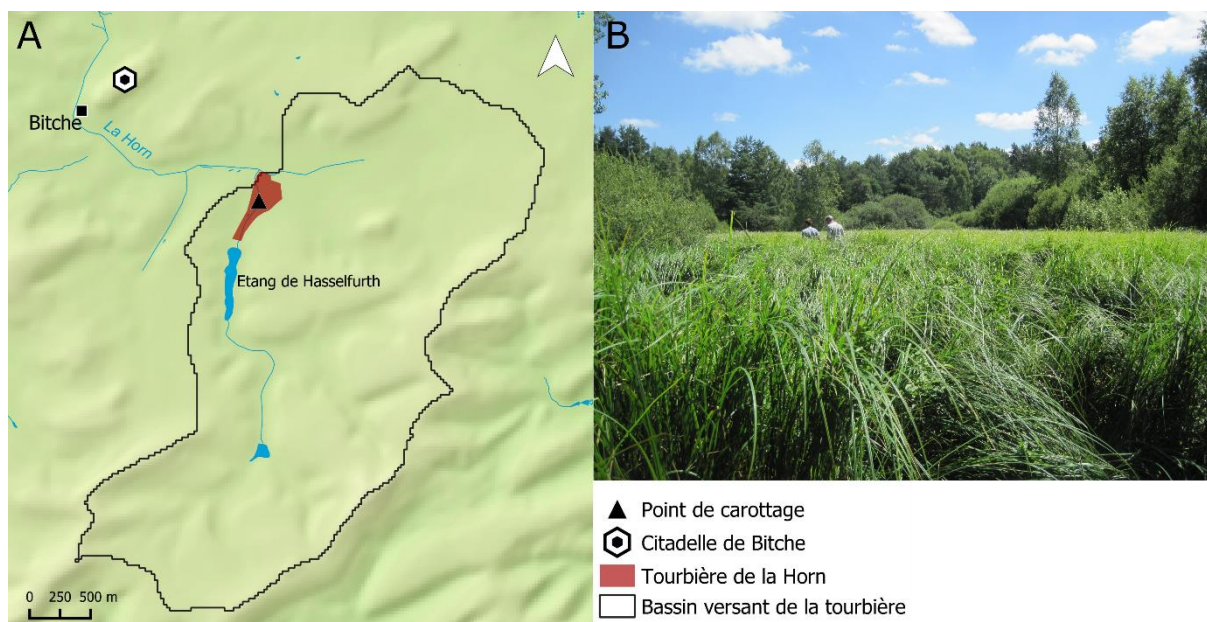


Figure III.1-1 : Localisation de la tourbière de La Horn et de son bassin versant (A) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTI2 ©IGN) et photo du site de prélèvement (B) (cliché: E. Gouriveau)

La végétation actuelle de la tourbière est composée d'une mosaïque d'habitats humides. On y trouve des communautés de grandes laïches (magnocariçaie, type d'habitat EUNIS D5.21), caractéristiques de stations d'atterrissement (généralement pauvres en espèces et monospécifiques), se développant sur des sols gorgés d'eau (Figure III.1-1.B) (BAJOUK *et al.*, 2015). Des formations végétales liées aux tourbières hautes en voie d'assèchement, fauchées ou brûlées et envahies par la molinie sont également présentes (type d'habitat EUNIS D1.121), dominée par la Molinie bleue (*Molinia caerulea*), accompagnée de communautés de Sphaigne papilleuse (*Sphagnum papillosum*) et d'espèces particulières comme la Drosera à feuille ronde (*Drosera rotundifolia*), la Linaigrette vaginée (*Eriophorum vaginatum*) et la Rhynchospore blanche (*Rhynchospora alba*). Sur des zones plus évoluées de la tourbière, le pin sylvestre s'est développé pour former des pinèdes tourbeuses à *Pinus sylvestris* (type d'habitat EUNIS G3.E2).

III.1.2. Contexte historique du site de la Horn

L'étang d'Hasselfurth, en aval duquel s'étend la tourbière est absent de la carte de Cassini (XVIII^{ème} siècle) mais apparaît sur les cartes de l'Etat major (1820-1866) (Figure III.1-2). Dans les périodes très récentes, la tourbière a été drainée, par création de fossés, afin de l'assécher pour son exploitation en prairie de fauche avant d'être abandonnée probablement après la Seconde Guerre Mondiale.

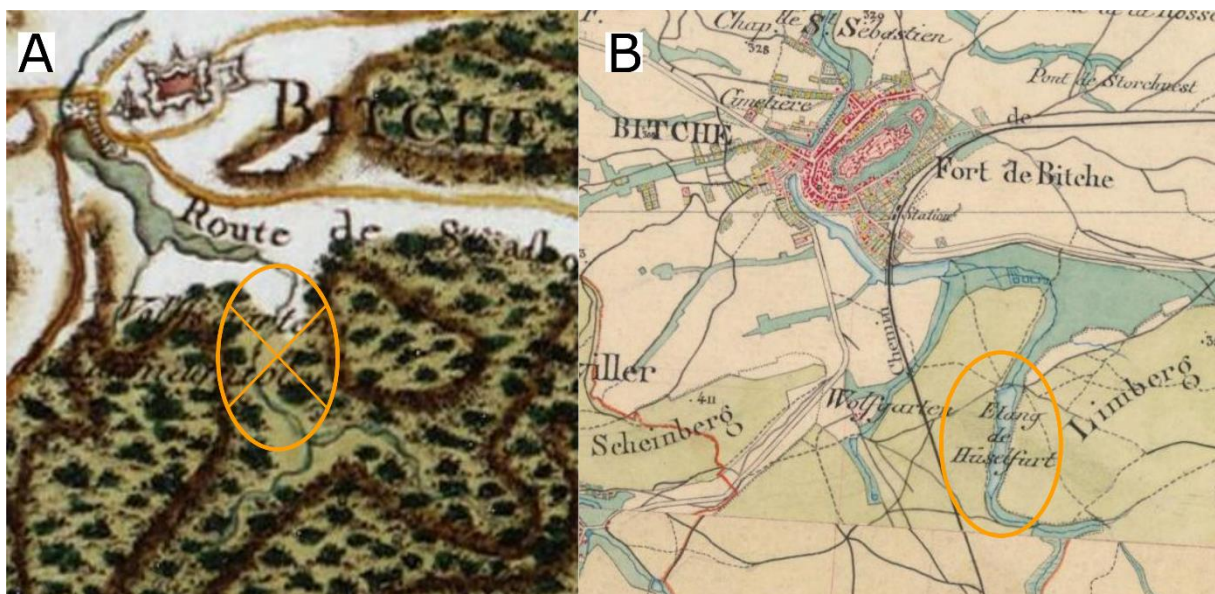


Figure III.1-2: Absence de l'étang d'Hasselfurth sur la carte de Cassini (A) (source : Géoportail, ©CNRS, BNF) et sa représentation sur les cartes d'Etat Major (B) (source: Géoportail, ©CNRS, BNF, IGN)

La localisation de la tourbière de La Horn fait d'elle un site intéressant pour l'étude des relations homme/environnement. En effet, elle est située à seulement 1,5 km du centre de la ville de Bitche et de sa citadelle. L'origine de la ville de Bitche, localisée en bordure du pays couvert du Pays de Bitche, semble être liée à la construction d'un premier château. La première mention du château de Bitche, alors mentionné en tant que « castrum Bytis », remonte à 1155 (MENGUS, 2009). Ce château a été la volonté des ducs de Lorraine, qui lui voyaient alors un important rôle stratégique (JACOBS *et al.*, 1990). Les premières mentions du bourg castral, au pied de l'éperon rocheux, datent de 1297 et 1302 (MENGUS, 2009). En 1563, la « ville » a été protégée d'une enceinte de pierre, remplaçant la palissade de bois. Le château, bien qu'assiégé par les Suédois au cours de la Guerre de Trente Ans, sort indemne des 30 ans de conflit.

À partir de 1679-1680, la construction de la citadelle est engagée par Vauban (Figure III.1-3). Cette construction ainsi que celle des fortifications de la ville ont nécessité une énorme quantité de bois (surtout de gros chênes), engendrant de grosses coupes dans les forêts, essentiellement celles de la « montagne » du Schoenberg (JEHIN, 2005). Par la suite, la citadelle sera démolie en 1697, suite à la paix de Ryswick, avant d'être à nouveau reconstruite en 1741. Rappelons que c'est également sur la commune de Bitche que les vestiges d'un élément de voirie gallo-romaine ont été découverts, attestant de la présence de population à proximité.



Figure III.1-3 : Entrée de la citadelle de Vauban à Bitche (cliché : E.Gouriveau)

De plus, la tourbière est localisée à environ 4km du Ring d'Haspelschiedt, site fortifié de l'Âge du Fer qui semble avoir constitué un pôle important dans cette région (SCHMIT, 2008 ; SCHMIT *et al.*, 2017).

III.1.3. Description de la séquence et chronologie

La tourbière de la Horn (HOR) a été sondée en juillet 2017, au centre d'une cariçaie et a livré une séquence de 284 cm (Figure III.1-4). Un carottage supplémentaire des cinquante premiers centimètres de la surface a été réalisé afin de pallier l'absence de sédiment dans le sommet de du premier sondage.

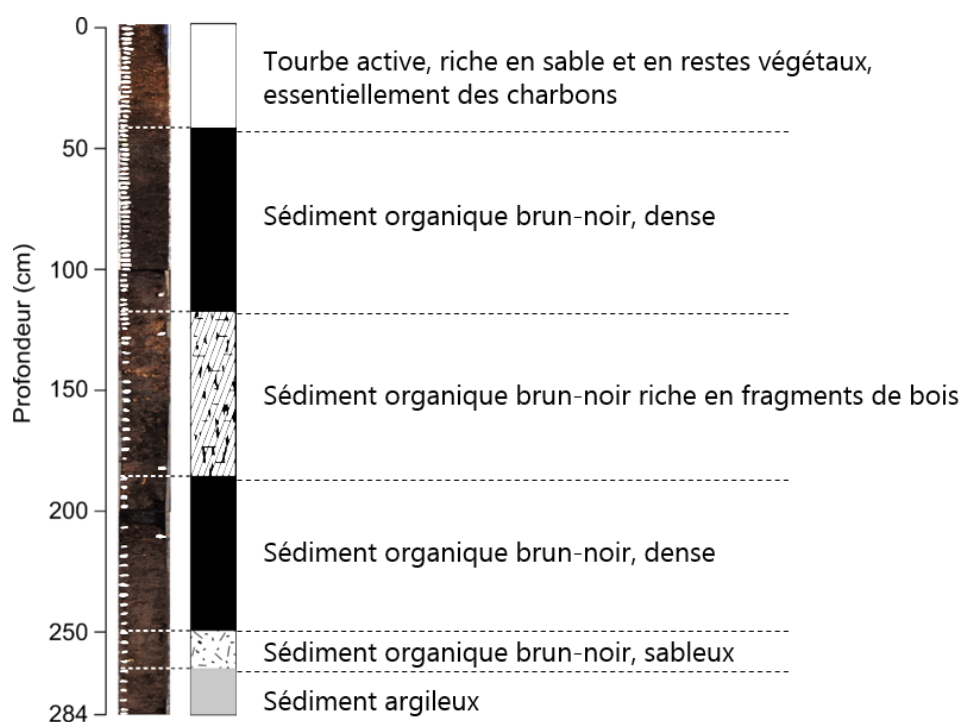


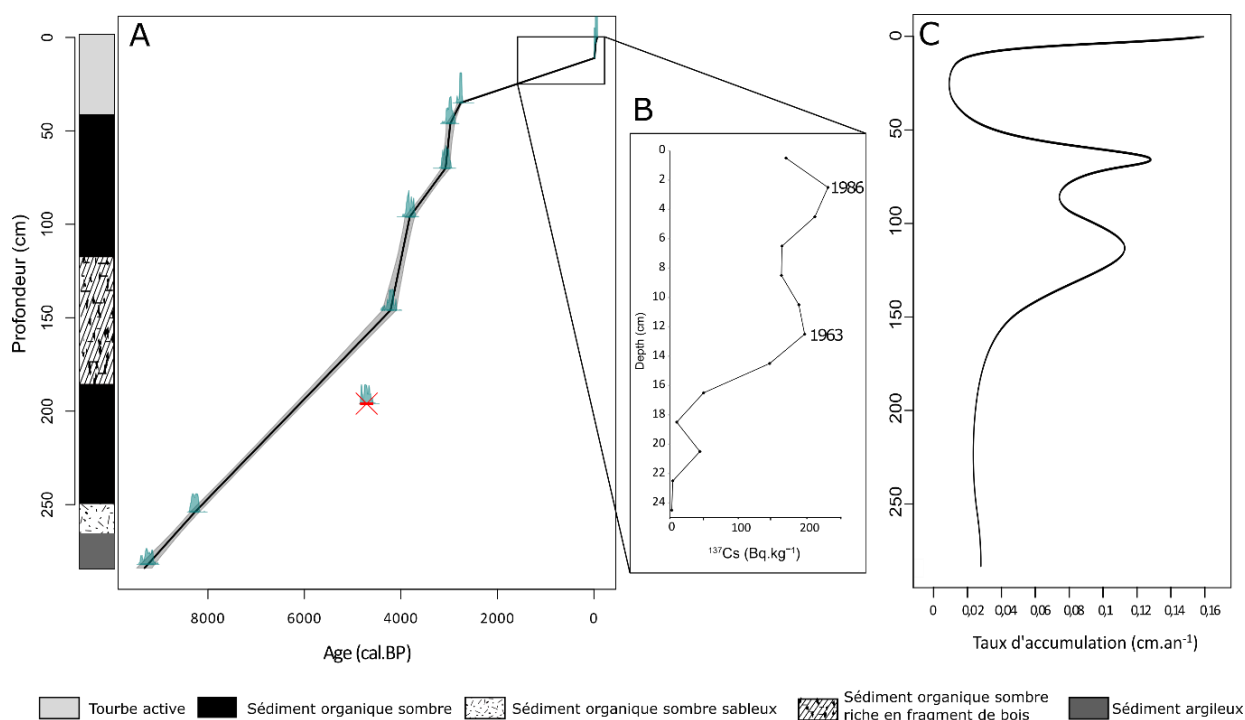
Figure III.1-4 : Photographie et description de la séquence de HOR

Pour cette séquence, sept échantillons ont été envoyés pour datation radiocarbone (Tableau III.1-1). Une date n'a pas été prise en compte pour la construction du modèle âge-profondeur (Poz-105882, 196 cm) car elle plaçait l'arrivée de *Fagus* 2000 ans plus tard que dans les autres sites étudiés (KOH et WAL).

Tableau III.1-1 : Datations radiocarbone effectuées pour la séquence de La Horn. Les dates en grisé ont été écartées du modèle âge-profondeur.

ID laboratoire	Profondeur (cm)	Type d'échantillon	Age ^{14}C BP	Age cal. BP (2σ)	Age cal. BC/AD (2σ)
Poz-103811	46	Graines de <i>Carex</i>	2865±30	3072 - 2879	BC 1123 -930
Poz-109250	70	Sédiment total	2920 ± 30	3160 - 2969	BC 1211 -1020
Poz-105880	96	Sédiment total	3540±35	3914 - 3703	BC 1965 -1754
Poz-105881	146	Sédiment total	3815±35	4299 - 4089	BC 2350 -2140
Poz-105882	196	Sédiment total	4180±35	4838 - 4610	BC 2889 -2661
Poz-98164	254	Charbon	7450±50	8371 - 8182	BC 6422 -6233
Poz-96859	282	Restes végétaux	8260±40	9410 - 9120	BC 7461 -7171

Le modèle âge-profondeur a été construit en utilisant un modèle d'interpolation linéaire (Figure III.1-5.B). Les mesures du ^{137}Cs sur le sommet de la carotte ont permis de distinguer deux pics : l'un à 11 cm, corrélé au maximum des essais nucléaires atmosphériques en 1963 ; l'autre à 3 cm, correspondant à l'accident de Tchernobyl en 1986. Ces deux dates ont été utilisées pour contraindre le modèle âge-profondeur du sommet de la séquence (Figure III.1-5.C).

Figure III.1-5: Modèle âge-profondeur de la séquence de HOR (A), courbe de l'activité du ^{137}Cs (B) et évolution du taux d'accumulation (C)

Le modèle âge-profondeur de la HOR couvre presque tout l'Holocène, à partir de 9300 cal.BP jusqu'au présent. Le taux d'accumulation moyen des 44 premiers centimètres est de 0,14 mm.an⁻¹ (Figure III.1-5.D). En revanche, le taux d'accumulation accélère entre 4200 et 2800 cal.BP, soit entre 146 et 44 cm, où il atteint 0,8 mm.an⁻¹. Les 146 derniers centimètres ont un taux d'accumulation moyen de 0,27 mm.an⁻¹.

III.1.4. Résultats

Les résultats sont présentés sur les figures III.1-6 (p. 136), III.1-7 (p. 138), III.1-8 (p. 140) et III.1-9 (p. 142) et les principaux résultats sont résumés ensuite dans les tableaux III.1-2 et III.1-3 (p. 146 et 147).

III.1.4.1. Description des résultats

- LPAZ HOR1

La première zone pollinique délimitée à la base de la séquence est caractérisée par la dominance de *Pinus* et *Corylus* et par un très fort pourcentage des pollens arboréens (85%). *Quercus*, *Ulmus*, *Tilia* et *Fraxinus* sont présents et leurs pourcentages sont en augmentation. Les taxons herbacés sont dominés par les Poaceae, accompagnés par quelques autres taxons (*Anthemideae*, *Artemisia*, *Cichorioideae*, *Rumex*, *Calluna*). Au milieu de la zone, les pourcentages de *Pinus* chutent puis augmentent à nouveau, avant de diminuer à la fin de la zone, accompagné par une forte chute des pourcentages de *Corylus*.

La végétation locale de cette première zone est dominée par le bouleau et le saule. Le cortège des herbacées est dominé par les Cyperaceae, les Poaceae et les taxons aquatiques (*Potamogeton*, *Typha latifolia*, *Typha/Sparganium*). Les pourcentages d'aulne, jusqu'alors très faibles augmentent à la fin de la zone, alors que ceux du saule diminuent.

Les analyses des MNP et des μ PC n'ont pas été menées pour cette zone pollinique. En revanche, l'analyse des MPC montre deux légers pics significatifs du taux d'accumulation des macroparticules carbonisées.

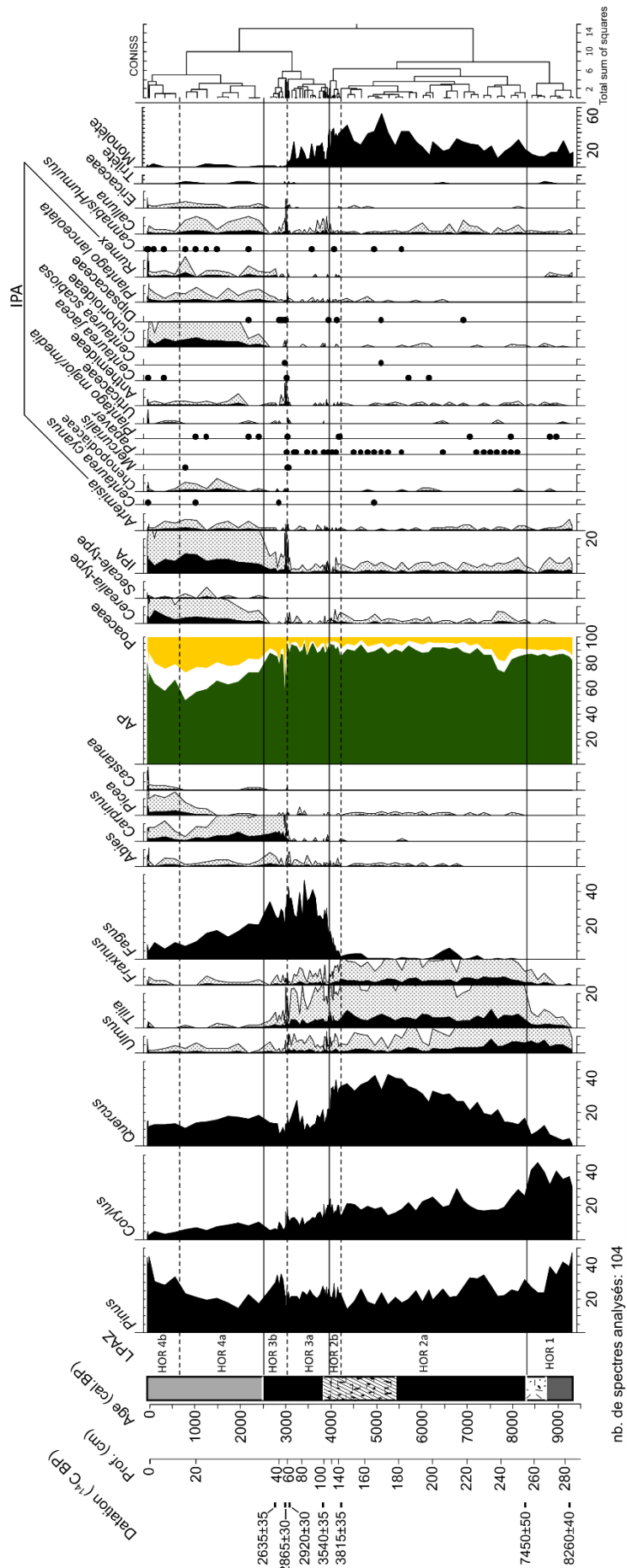


Figure III.1-6: Diagramme pollinique simplifié de la végétation régionale de la séquence de HOR. LPAZ : local pollen assemblage zone, AP : arboreal pollen, IPA : indices polliniques d'anthropisation. (analyses : E.Gouriveau, P.Ruffaldi)

La zone 1 est caractérisée par un fort taux de matière minérale dans le sédiment, qui augmente (jusqu'à 90%) avant de diminuer au sommet de la zone. Parallèlement, les teneurs en silice, titane et rubidium augmentent.

- LPAZ HOR2a

Au début de la zone, la courbe des AP/T montre un recul temporaire, contemporain de l'augmentation des pourcentages des pollens de Poaceae et des pollens de *Cerealia*-type, ainsi que l'apparition des pollens de *Papaver*. Les pollens de *Cerealia*-type restent présents tout au long de la zone. Les taxons herbacés présents à la zone précédente sont également visibles dans cette deuxième zone, qui voit une légère augmentation des pourcentages de pollens de *Calluna* ainsi que l'apparition de ceux de *Plantago lanceolata*. Après leur brève diminution, les pourcentages des pollens arboréens augmentent à nouveau et oscillent autour d'une valeur supérieure à celle de la première zone (90%). La chute des pourcentages des pollens de *Corylus*, entamée à la zone 1, se poursuit alors que les pourcentages de pollens de *Quercus* continuent d'augmenter jusqu'à de fortes valeurs (42%). Après avoir atteint sa valeur maximale, la courbe pollinique de *Quercus* commence à décliner. Au début de la zone, celle de *Fagus* devient continue, avec un premier pic (6,7%) et les pollens de nouveaux taxons font leur apparition dans cette zone : *Picea*, *Abies*, *Carpinus*. À l'inverse, les pourcentages de pollens d'*Ulmus* régressent le long de la zone et ceux de *Tilia* et *Fraxinus* se maintiennent autour de faibles valeurs (<10%) avant que les pourcentages de pollens de *Tilia* chutent à la fin de la zone.

L'assemblage de la végétation locale est maintenant dominé par l'aulne et le bouleau, accompagnés par la bourdaine dont les pourcentages polliniques augmentent au début de la zone. Les pourcentages des pollens de *Salix*, après avoir diminué à la fin de la zone 1, augmentent jusqu'à atteindre leur valeur maximale au milieu de la zone, avant de diminuer à nouveau. Les pollens de Rosaceae arborescents se font plus fréquents. Les taxons herbacés sont toujours dominés par les Cyperaceae alors que les pourcentages des pollens de Poaceae déclinent au début de la zone. Les pourcentages des taxons aquatiques diminuent au début de la zone et deviennent rares tout au long du reste de la séquence. La courbe de *Lysimachia* devient continue et atteint des valeurs comparables à celles des Cyperaceae, qui diminuent légèrement par rapport à la zone 1. À la fin de la zone, les pourcentages d'*Alnus* chutent.

Comme pour la zone précédente, les analyses des MNP et des μ PC n'ont pas été réalisées.

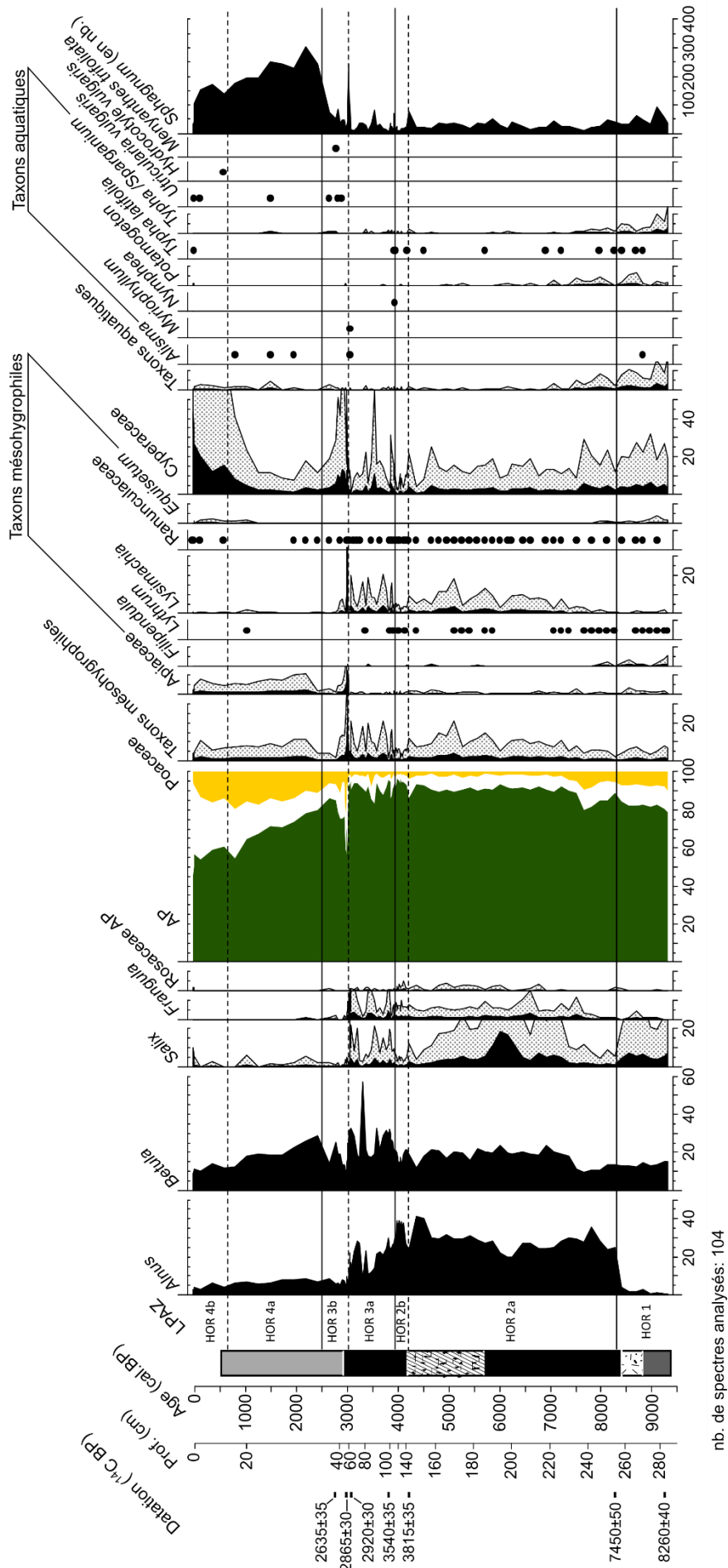


Figure III.1-7: Diagramme pollinique simplifié de la végétation locale de la séquence de HOR. LPAZ: local pollen assemblage zone, AP: arboreal pollen. (analyses : E.Gouriveau, P.Ruffaldi)

Le début de la zone 2a montre une très forte réduction de la fraction minérale dans le sédiment qui réaugmente progressivement par la suite, avant de diminuer à nouveau au sommet de la zone. Les teneurs en silice, aluminium, titane et rubidium suivent également ce schéma. Les valeurs des rapports Ni/Ti et Fe/Ti augmentent le long de la zone.

- LPAZ HOR2b

Cette zone se distingue uniquement de la précédente par le début de la forte augmentation des pourcentages de pollens de *Fagus*. À la toute fin de la zone, ceux de *Quercus* chutent de manière très importante, de 35% au début de la zone à environ 20% à la fin, accompagnés par ceux de *Fraxinus*.

Dans la végétation locale, les pourcentages des pollens d'*Alnus* augmentent pour retrouver leur valeur d'avant la chute puis déclinent fortement à la transition avec la zone 3a.

Comme pour les deux précédentes zones, les analyses des MNP et des μ PC n'ont pas été réalisées.

Le taux de fraction minérale diminue encore alors que les teneurs en silice, titane et rubidium se stabilisent et que les valeurs des rapports Fe/Ti et Ni/Ti augmentent.

- LPAZ HOR3a

Cette zone est marquée par la forte augmentation des pourcentages des pollens de *Fagus* qui atteignent leur valeur maximale (46,8%). À l'inverse, ceux de *Quercus* et de tous les autres taxons présents précédemment déclinent, à l'exception de ceux de *Pinus* qui restent stables. Un pic des pourcentages de pollens de *Quercus* est tout de même enregistré vers le sommet de la zone. Les pourcentages des pollens de Poaceae se maintiennent à leur valeur de la zone HOR2a alors que les pollens de *Cerealia*-type et des autres herbacées se raréfient. Le nombre des spores monolètes diminue également à partir du début de la zone, alors que les pourcentages de pollens de *Calluna* augmentent temporairement. La courbe pollinique continue de *Carpinus* débute à la toute fin de la zone.

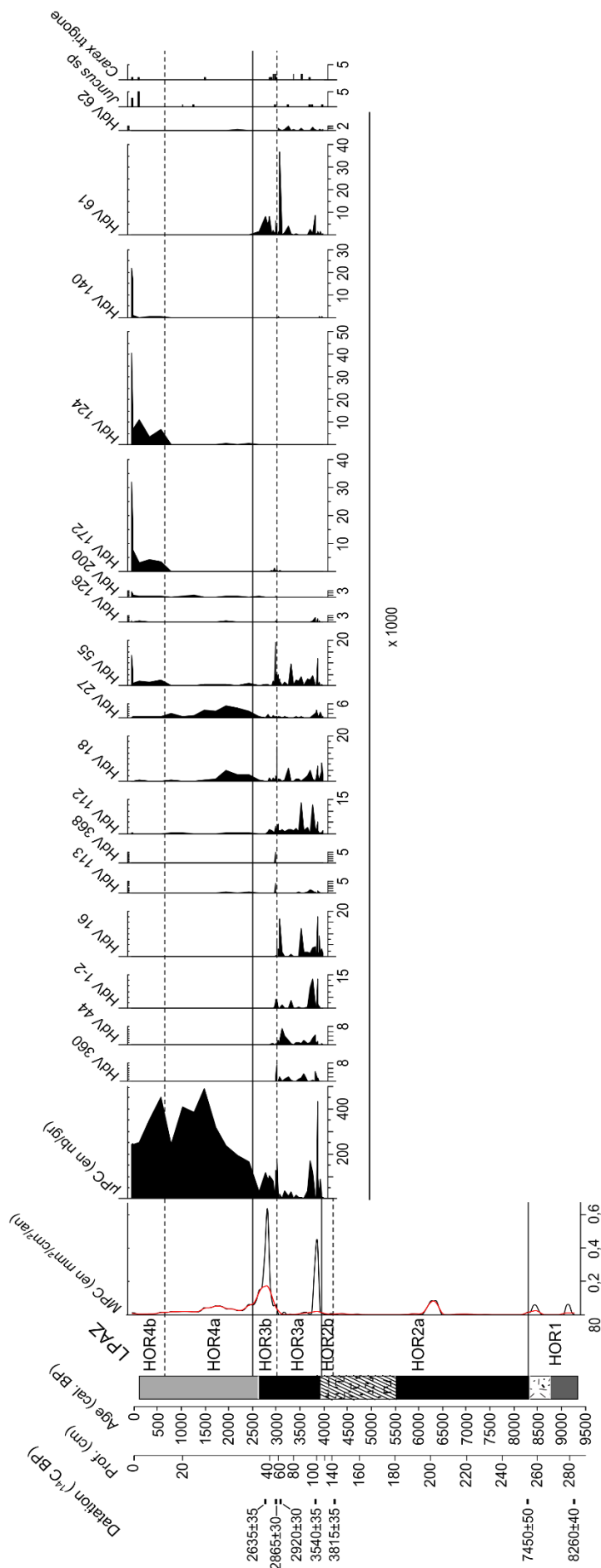


Figure III.1-8: Résultats des comptages des spores de champignons et restes d'algues, des micro-particules carbonisées (μ PC) et analyse des macro-particules carbonisées (MPC), ainsi que le nombre des carpores identifiés dans la séquence de HOR. (analyses : E.Gouriveau, analyses MPC : V.Robin, analyses carpologiques : C.Schaal)

Les pourcentages des pollens d'*Alnus* diminuent à nouveau avant de réaugmenter temporairement en fin de zone. Tous les pourcentages des pollens des autres taxons présents oscillent tout au long de la zone. Les pourcentages des pollens de *Betula* subissent de fortes variations mais augmentent par rapport à la zone précédente, alors que les pollens de Rosaceae arborescents disparaissent quasiment.

Le début de la zone est marqué par un pic de la concentration des μPC ainsi que du taux d'accumulation des MPC. De nombreux MNP sont présents en concentration plus ou moins importante et l'analyse carpologique révèle la présence de restes de graines de *Juncus* sp. et de *Carex* trigone.

Dans cette zone, la perte au feu montre un taux de matière minérale le plus bas de toute la séquence (entre 10 et 15%). À la fin de la zone, les valeurs des rapports Ni/Ti et Fe/Ti augmentent.

- LPAZ HOR3b

La zone débute par une quasi-disparition des spores monolètes et surtout par une chute très importante des pourcentages des pollens arboréens qui passent de 93,4% à 68,2%. Cette chute, bien que très brève est perçue sur quatre échantillons analysés et est directement suivi d'une deuxième chute (de 84,7% à 58,4%), puis d'une troisième moins importante (de 86,7% à 79%). Ces chutes sont contemporaines de pics des pourcentages polliniques des Poaceae, des Anthemideae, des Cichorioideae et de *Calluna*, ainsi que d'une augmentation des pourcentages de pollens de *Plantago lanceolata*. Par la suite, la courbe des AP réaugmente et les pourcentages des taxons herbacés retrouvent leurs valeurs de la zone précédente. Puis, de nouveau, au sommet de la zone, les pourcentages des pollens arboréens déclinent alors que ceux du chêne et du noisetier augmentent, tout comme ceux des herbacées (*Cerealia*-type, *Artemisia*, Cichorioideae, *Plantago lanceolata*, *Rumex*, *Calluna*) dont les courbes deviennent continues. Au début de la zone, les spores monolètes disparaissent quasiment.

La zone 3b enregistrent de nombreux changements au niveau de la végétation locale. Tout d'abord, les pourcentages des pollens d'*Alnus* atteignent des valeurs très faibles, proches de celles observées dans la zone 1. De même, les pourcentages de pollens de *Salix*, *Frangula*, des Rosaceae arborescents et de *Lysimachia* déclinent drastiquement et les pollens de ces taxons ne sont plus identifiés que très rarement. À l'inverse, les pourcentages des pollens des

Cyperaceae et des Apiaceae atteignent de fortes valeurs (respectivement 12,3% et 6,1%) puis diminuent très rapidement. Le nombre des spores de *Sphagnum* augmentent de manière importante tout au long de la zone.

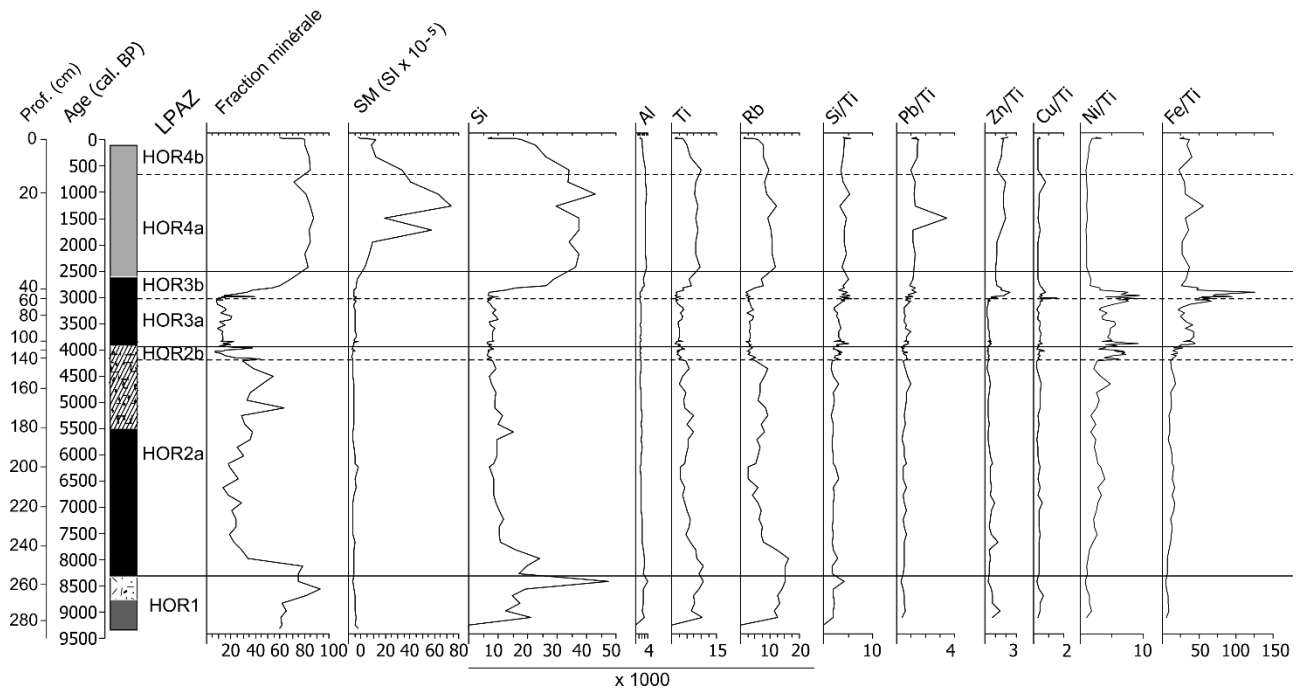


Figure III.1-9 : Résultats de la perte au feu, des mesures de susceptibilité magnétique et résultats simplifiés de l'analyse XRF de la séquence de HOR

Au début de la zone, les μ PC enregistrent un pic de leur concentration alors que la plupart des MNP présents dans la zone précédente disparaissent complètement, comme par exemple les types HdV 360, HdV 44, HdV 1-2 et HdV 16. Les autres microfossiles de la zone 3a restent présents mais leur concentration chute à de faibles valeurs après avoir atteint de fortes concentrations au début de la zone. De même, les carpores de *Juncus* sp. et *Carex trigone* se raréfient. Le microfossile HdV 200 apparaît au cours de la zone. Au cours de la zone, les MPC enregistrent également un important pic de leur taux d'accumulation. Enfin, à la fin de la zone 3b, le type HdV 61 disparaît et les concentrations des types HdV 18 et HdV 27 augmentent, tout comme les concentrations des μ PC.

Dans le sédiment, cette zone montre une forte augmentation de la fraction minérale qui retrouve ses valeurs de la zone 1, tout comme les teneurs en silice, titane et rubidium, et les valeurs de la susceptibilité magnétique. De plus, les valeurs des rapports Ni/Ti et Fe/Ti continuent d'augmenter accompagnés par une faible augmentation de celles des rapports de Pb/Ti, Zn/Ti et Cu/Ti qui diminuent ensuite.

- LPAZ HOR4a

Cette zone est marquée par la diminution progressive des pourcentages des pollens d'arbres (de 88% à 50,5%), essentiellement *Fagus*, *Corylus*, et *Carpinus*, accompagnés à partir du milieu de la zone de *Quercus*, alors que les pourcentages polliniques de *Pinus* réaugmentent après avoir atteint leur valeur minimale au début de la zone. Quelques pollens de *Castanea* font leur apparition au début de la zone et les pourcentages polliniques de *Picea*, dont les pollens sont jusqu'alors présents sporadiquement, augmentent fortement dans la deuxième moitié de la zone. À l'inverse des pollens d'arbres, les pourcentages des pollens des taxons herbacés augmentent fortement, essentiellement ceux des Poaceae et des céréales, mais également ceux de nombreux indices polliniques d'anthropisation (*Artemisia*, Chenopodiaceae, Anthemideae, Cichorioideae, *Plantago lanceolata*, *Rumex*) et de *Calluna*. C'est également dans cette zone qu'apparaissent les premiers pollens du type *Secale* et que quelques spores trilètes sont comptées. Au sommet de la zone, les pourcentages des pollens d'arbres augmentent.

Pour la végétation locale, les pourcentages de pollens de *Betula* diminuent alors que ceux des Apiaceae augmentent, accompagnés à partir du milieu de la zone par une augmentation des pourcentages des pollens des Cyperaceae. Tout au long de la zone, le nombre des spores de *Sphagnum*, qui a atteint sa valeur maximale de la séquence au début de la zone, diminue.

Au cours de cette zone, les concentrations des μPC enregistrent une très importante hausse et atteignent leur maximum de la séquence au milieu de la zone avant de diminuer, puis de réaugmenter à la fin de la zone. L'augmentation des concentrations des spores de type HdV 18 et HdV 27 se poursuit jusqu'à la fin du premier tiers de la zone puis elles diminuent. À la fin de la zone, les concentrations des spores des types HdV 55, HdV 172, HdV 124 et HdV 140 commencent à augmenter.

La zone 4a est marquée par de très fortes valeurs de la fraction minérale dans le sédiment ainsi que de la susceptibilité magnétique et des autres éléments (silice, aluminium, titane, rubidium). Les valeurs de SM et la teneur en silice diminuent ensuite dans le dernier tiers de la zone. Les rapports des éléments métalliques sur le titane montrent de brèves augmentations à différents moments de la zone et le rapport Pb/Ti atteint sa valeur maximale de toute la séquence.

- LPAZ HOR4b

Cette dernière zone enregistre un recul puis une hausse des pourcentages de pollens d'arbres, essentiellement représentés par *Pinus*, *Carpinus* et *Picea*, alors que ceux des Poaceae, de nombreux IPA (*Artemisia*, Chenopodiaceae, *Rumex*) ainsi que ceux de la *Calluna* diminuent. Les pourcentages des céréales, quant à eux, augmentent jusqu'à leur valeur maximale de la séquence, avant de régresser à la fin de la zone. Les pollens de *Castanea* apparaissent et leur pourcentage augmente au cours de la zone.

Le spectre de la végétation locale est caractérisé dans cette zone par une forte augmentation des pourcentages des pollens des Cyperaceae.

Les concentrations des μ PC enregistrent une importante diminution jusqu'à la surface. L'augmentation des concentrations des spores de type HdV 55, HdV 172, HdV 124 et HdV 140, débutée à la fin de la zone précédente, continue et s'intensifie très fortement pour les échantillons de surface. Au sommet de la zone, l'analyse carpologique identifie des restes de *Juncus* sp. et de *Carex* trigone.

Le pourcentage de fraction minérale dans le sédiment ainsi que les rapports Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti, Ni/Ti et Fe/Ti restent plus ou moins stable alors que les valeurs de la susceptibilité magnétique, les teneurs en silice, en aluminium, en titane et en rubidium diminuent.

III.1.4.2. Commentaires

Les microfossiles non-polliniques n'ayant pas été comptés dans les niveaux inférieurs de la séquence (jusqu'à 118 cm, soit autour de 3990 cal. BP), il est délicat d'interpréter leur concentration dans la zone 3a. En revanche, pour beaucoup des microfossiles identifiés dans cette zone, leur présence n'est attestée qu'à partir du deuxième ou du troisième échantillon analysé (116 cm ou 114 cm), ce qui indique soit que leur présence n'est pas continue tout au long de la partie inférieure de la séquence, soit qu'ils font leur apparition à partir de ces niveaux. La seule manière de confirmer l'une ou l'autre de ces hypothèses étant d'analyser le bas de la séquence. La même limite peut être posée à l'interprétation des pics de concentration des μ PC du début de la zone.

De plus, la représentation des résultats des analyses polliniques en concentration (nombre de grains/spores par gramme de sédiment) (Figure III.1-10) montre une augmentation, entre

126 cm (soit 4050 cal.BP) et 54 cm (soit 3010 cal.BP), des concentrations de tous les taxons présents. La représentation des spores de champignons et des algues en concentration (Figure III) montre également que beaucoup d'entre eux sont présents entre 126 et 54 cm avec des concentrations importantes.

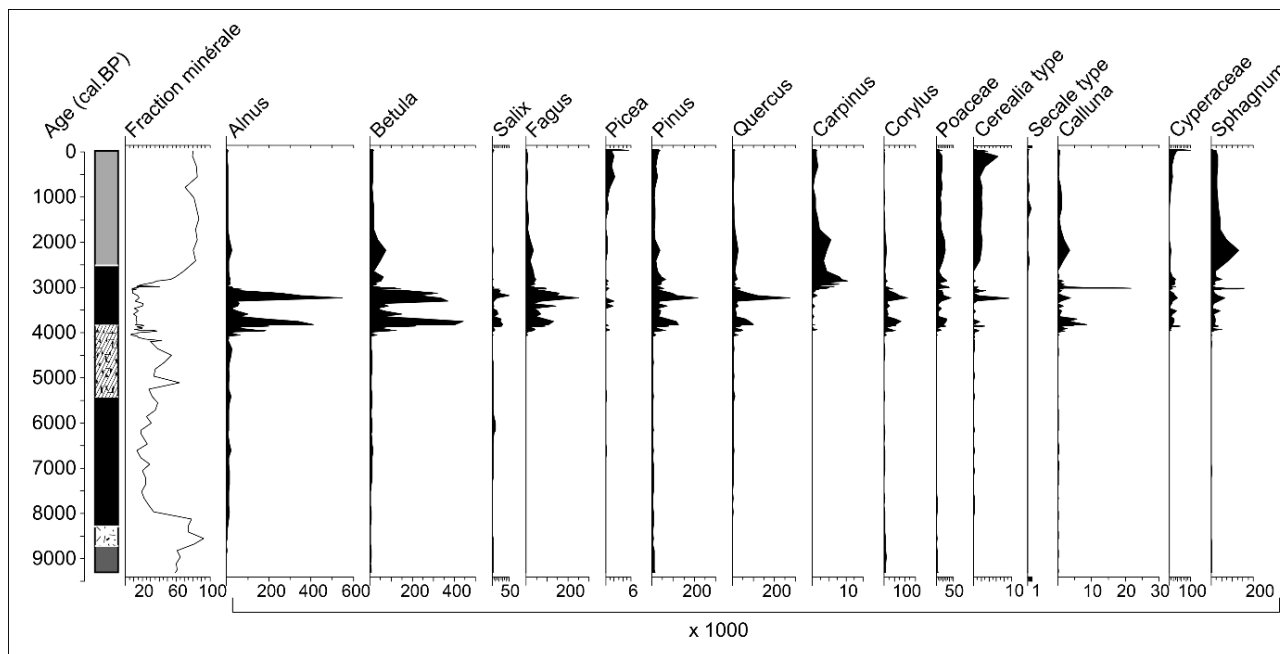


Figure III.1-10: Courbes de quelques taxons polliniques présentés en concentration (nb/gramme de sédiment) et courbe de la fraction minérale pour la séquence de HOR.

Ces augmentations des concentrations des microfossiles (polliniques et non-polliniques) sont synchrones, d'une part, avec l'augmentation du pourcentage de matière organique dans le sédiment montrée par la perte au feu, et, d'autre part, avec une augmentation du taux d'accumulation calculé par le modèle âge-profondeur (Figure III.1-5). De plus, cette période d'augmentation de l'accumulation est encadrée par deux pics du taux d'accumulation des MPC.

Ces observations indiquent probablement un problème taphonomique, lié à une conservation différentielle des microfossiles au cours de cette période, correspondant à la LPAZ HOR3a. L'importante diminution des concentrations ou la disparition des MNP à la fin de cette zone doivent donc être interprétées avec précaution, pouvant résulter d'une meilleure conservation des microfossiles dans cette zone, par exemple suite à une modification hydrique de la tourbière.

Tableau III.1-2 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de HOR, concernant les enregistrements extra-locaux à régionaux (pollens, XRF, μ PC) ainsi que la perte au feu (PAF) et la susceptibilité magnétique (SM). (AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, IPA : indices polliniques d'anthropisation, \uparrow : augmentation, \downarrow : diminution, max. : valeur maximale)

Bornes en cal.BP (profondeur) LPAZ	Essences dominantes	Végétation forestière	NAP, céréales et IPA	PAF, XRF, SM et μ PC
-46 (2cm) HOR 4b	<i>Pinus</i> - <i>Quercus-Fagus</i>	-335 cal.BP: pic de <i>Carpinus</i> (2,3%) et \uparrow AP -565 cal.BP: pic AP (67%) et courbe continue de <i>Castanea</i> \uparrow <i>Picea</i>	-100 cal.BP: max.céréales (8%), puis \downarrow -335 cal.BP: \downarrow Poaceae, IPA -565 cal.BP: \uparrow Poaceae, céréales, IPA	\downarrow SM, Si, Ti, Rb -565 cal.BP: pic de μ PC, puis \downarrow
650 (17cm) HOR4a	<i>Pinus</i> - <i>Fagus-Quercus</i>	-800 cal.BP: mini. AP (50%), puis \uparrow -1260 cal.BP: courbe continue de <i>Picea</i> -1490 cal.BP: brève \uparrow AP -1950 cal.BP: mini. <i>Pinus</i> (14,6%) puis \uparrow -2415-2185 cal.BP: rares pollen de <i>Castanea</i>	-800 cal.BP: max. Poaceae (28,1%) et IPA (11,5%) puis \downarrow \uparrow Poaceae, céréales, IPA (<i>Artemisia</i> , Chenopodiaceae, Anthemideae, Cichorioideae, <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Rumex</i>) - quelques pollens de <i>Secale-type</i> -2415 cal.BP: \uparrow <i>Calluna</i> et spores trilètes	-800 cal.BP: pic Cu/Ti et Zn/Ti, puis \downarrow -1030 cal.BP: max. Si, puis \downarrow -1260 cal.BP: max. SM, pic Fe/Ti, puis \downarrow -1490 cal.BP: max. Pb/Ti, puis \downarrow , pic Zn/Ti -1490 cal.BP: max. μ PC, puis \downarrow -2425 cal.BP: max. fraction minérale
2500 (33cm) HOR3b	<i>Fagus</i> -	-2650 cal.BP: AP \downarrow -2860 cal.BP: pic de <i>Carpinus</i> (6%) -2900 cal.BP: plusieurs brèves \downarrow AP -3000 cal.BP: 1er pollen de <i>Castanea</i> \rightarrow <i>Fagus</i> and <i>Pinus</i> \downarrow <i>Ulmus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Fraxinus</i>	-2650 cal.BP: \uparrow Poaceae, céréales, IPA (Cichorioideae, <i>Artemisia</i> , <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Rumex</i>) et <i>Calluna</i> \uparrow IPA : <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Rumex</i> -2975 et 2860 cal.BP: \uparrow Poaceae, IPA (Anthemideae, <i>Plantago lanceolata</i> , Cichorioideae) et <i>Calluna</i>	-2650 cal.BP: \uparrow μ PC -2900 cal.BP: pic de Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti -2940 cal.BP: \uparrow Si, Al, Ti, Rb -2940 cal.BP: \uparrow fraction minérale -3025 cal.BP: pic de μ PC \uparrow SM
3025 (58cm) HOR3a	<i>Pinus</i>	-3075 cal.BP: \uparrow <i>Carpinus</i> -3245 cal.BP: pic de <i>Quercus</i> (27,3%) -3420 cal.BP: max. de <i>Fagus</i> (46,8%) - présence de <i>Picea</i> et <i>Carpinus</i> \rightarrow <i>Quercus</i> et <i>Corylus</i>	-3900 cal.BP: petite phase de <i>Calluna</i> \downarrow céréales et IPA \downarrow spores monolètes	-3865 et 3700 cal.BP: pic de μ PC - fraction minérale basse (10-15%)
3950 (114cm) HOR2b	Chênaie diversifiée -	-4005 cal.BP: \downarrow <i>Quercus</i> -4150 cal.BP: \uparrow <i>Fagus</i> \downarrow <i>Fraxinus</i>	\downarrow céréales et IPA	\uparrow Fe/Ti, Ni/Ti \downarrow fraction minérale
4200 (146cm) HOR2a	<i>Pinus</i> - (<i>Corylus</i>)	-5260 cal.BP: max. de <i>Quercus</i> (20%), puis \uparrow -7970 cal. BP: début de la courbe continue de <i>Fagus</i> \uparrow <i>Quercus</i> et \downarrow <i>Ulmus</i> - apparition de <i>Picea</i> et <i>Abies</i> -8120-7670 cal. BP: \downarrow AP	-Poaceae <20% - présence de céréales et IPA -8120-7670 cal. BP: \uparrow Poaceae et céréales (1,5%) -8120-7220 cal.BP: \uparrow <i>Papaver</i>	-4510 cal.BP: \downarrow fraction minérale, puis \uparrow -5110 cal.BP: pic de la fraction minérale, puis \downarrow - Si, Ti, Rb \downarrow puis \uparrow - Ni/Ti, Fe/Ti \uparrow -8150 cal.BP: \downarrow fraction minérale (20% vers 7520 cal.BP)
8300 (254cm) HOR1	<i>Pinus</i> - <i>Corylus</i>	-8830 cal.BP: \downarrow <i>Pinus</i> -8410 cal. BP: \uparrow <i>Tilia</i> et <i>Fraxinus</i> -8550 cal. BP: \downarrow <i>Corylus</i> \uparrow <i>Quercus</i> et \uparrow <i>Ulmus</i>	-Poaceae <20% - présence de <i>Artemisia</i> et <i>Rumex</i>	-8500 cal.BP: \downarrow de la fraction minérale (de 90% à 20% vers 7520 cal.BP) \downarrow Si

Bornes en cal.BP (profondeur) LPAZ	Essences dominantes	AP	NAP	Spores de champignons coprophiles	MPC
-46 (2cm) HOR 4b	Cyperaceae - (Betula)	- <i>Alnus</i> et <i>Betula</i> stables	-↑Cyperaceae -↓ <i>Sphagnum</i>	-↑HdV55, HdV172, HdV124, HdV140 -↑ <i>Juncus</i> sp., <i>Carex</i> sp. trigone	
650 (17cm) HOR4a	<i>Betula</i> - NAP	-↓ <i>Betula</i>	-1950 cal.BP: ↑Cyperaceae -2415 cal.BP: ↑Apiaceae -2415 cal.BP: max. <i>Sphagnum</i> puis ↓	-↑HdV18, HdV27 puis ↓ -↑HdV55, HdV172, HdV124, HdV140	
2500 (33cm) HOR3b	<i>Betula</i> - (<i>Alnus</i>)	-↓ <i>Alnus</i> -3040 cal.BP: quasi disparition de <i>Salix</i> , <i>Frangula</i> et Rosaceae AP	-présence d' <i>Utricularia</i> -2900 cal.BP: pic de Cyperaceae (12,3%), puis ↓ -2990 cal.BP: quasi disparition de <i>Lysimachia</i> -2980 cal.BP: pic d'Apiaceae (6,1%) puis ↓ -↑ <i>Sphagnum</i>	-majorité des MNP ↓ -2980 cal.BP: pic de HdV113, HdV368, HdV18, HdV55 puis ↓ -HdV200 apparaît -2700 cal.BP: HdV18 et HdV27 ↑ - <i>Juncus</i> sp. et <i>Carex</i> sp. trigone ↓	-2840 cal.BP: pic des MPC
3025 (58cm) HOR3a		-↑ <i>Betula</i> -3190 cal.BP: pic d' <i>Alnus</i> (27,5%) puis ↓ -3300 cal.BP: mini. <i>Alnus</i> (7,8%) et max. <i>Betula</i> (53,8%)	-3530 cal.BP: pic de Cyperaceae (9,7%)	-présence de nombreux MNP -quelques restes de <i>Juncus</i> sp. et <i>Carex</i> sp. trigone	-3885 cal.BP: pic des MPC
3950 (114cm) HOR2b		-↑ <i>Alnus</i>	-	n.a.	
4200 (146cm) HOR2a	<i>Alnus</i> - <i>Betula</i>	-4360 cal.BP: ↓ <i>Alnus</i> -6015 cal.BP: pic de <i>Salix</i> (17,6%) -7670 cal.BP: ↑ <i>Betula</i> -8120 cal.BP: ↑ <i>Frangula</i>	-7670 cal.BP: ↑ <i>Lysimachia</i> , ↓Cyperaceae -quelques aquatiques (<i>Potamogeton</i> , <i>Typha latifolia</i>)	n.a.	
8300 (254cm) HOR1	<i>Betula</i> - <i>Salix</i>	-8550 cal.BP: ↑ <i>Alnus</i> et ↓ <i>Salix</i>	-présence d'aquatiques (<i>Potamogeton</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Typha/Sparganium</i>) -↓ <i>Sphagnum</i>	n.a.	-8470 cal.BP: pic des MPC -9105 cal.BP: pic des MPC

Tableau III.1-3 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de HOR, concernant les enregistrements locaux (pollens, MNP, MPC, graines). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, ↑ : augmentation, ↓ : diminution, max. : valeur maximale, mini. : valeur minimale, MNP : microfossiles non-polliniques

III.2. L'étang-tourbière de Kobert-Haut (KOH)

III.2.1. Localisation et végétation actuelle

L'étang-tourbière de Kobert-Haut (Welschkobertweiher ou Welschkobert, Figure III.2-1) se situe 2 km à l'est de la ville de Sturzelbronn dans le département de la Moselle (49° 3'7.30"N, 7°37'0.23"E) et à 14 km à l'est de Bitche (Figure III.1). Il est localisé sur le ruisseau du Neudoerferbach, à une altitude de 251 m. La surface de l'étang-tourbière est estimée autour de 5.68 ha. La tourbière s'étend en queue d'étang, en amont de celui-ci, dans une petite vallée tourbeuse. Elle est classée depuis 1985 et fait de nos jours partie de la Réserve Naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche (Figure I.1-8). La surface du bassin versant alimentant la tourbière, délimité par SIG (QGIS outil SAGA), a été estimée à 283.3 ha et s'étend au nord et à l'est de la tourbière (Figure III.2-1.A). Le bassin versant est entièrement constitué de Grès vosgien inférieur (t1b) (Figure I.1-5) (BLANALT *et al.*, 1967).

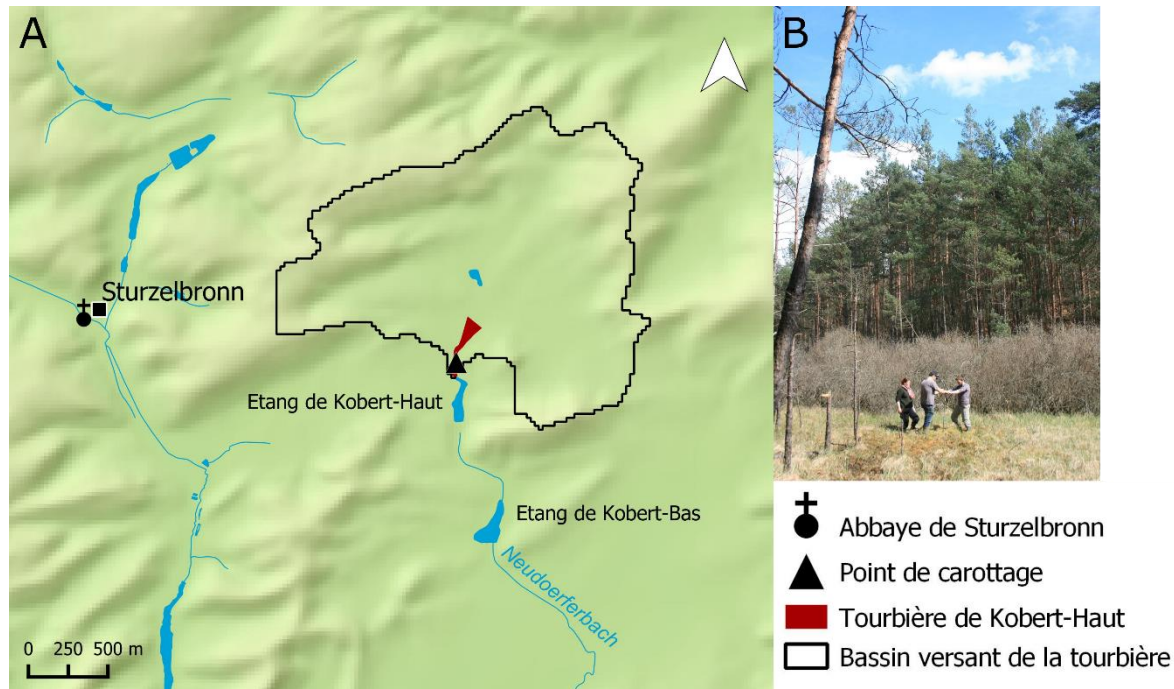


Figure III.2-1 : Localisation de la tourbière de Kobert-Haut et de son bassin versant (A) (auteur : E.Gouriveau, source : BDALTI2 ©IGN) et photo du site de prélèvement (B) (cliché: E.Gouriveau)

La végétation actuelle consiste en une cariçaie à *Carex lasiocarpa* (laïche à fruits velus) et *Carex rostrata* (laïche à ampoules), accompagnée de sphaignes (type d'habitat EUNIS D2.3), caractéristique des « zones humides à atterrissement incomplet occupées par une végétation turfifère avec des nappes d'eau acides ou (pour les radeaux de végétation) des eaux sous-jacentes acides des lacs ou des étangs » (Figure III.2-2) (BAJOUK *et al.*, 2015, p. 85). Tout comme à la tourbière de La Horn, on trouve des formations liées aux tourbières hautes en voie d'assèchement, fauchées ou brûlées (type d'habitat EUNIS D1.121), dominée par la Molinie bleue (*Molinia caerulea*) et accompagnée de communautés de Sphaigne papilleuse (*Sphagnum papillosum*). Des pinèdes tourbeuses à *Pinus sylvestris* (type d'habitat EUNIS G3.E2) se développent sur les marges de la tourbière. Le pin sylvestre, ainsi que l'épicéa (*Picea alba*) ont également été plantés autour de la tourbière, et le pin existe également sous forme de reboisements de *Pinus sylvestris* (type d'habitat EUNIS G3.4F).

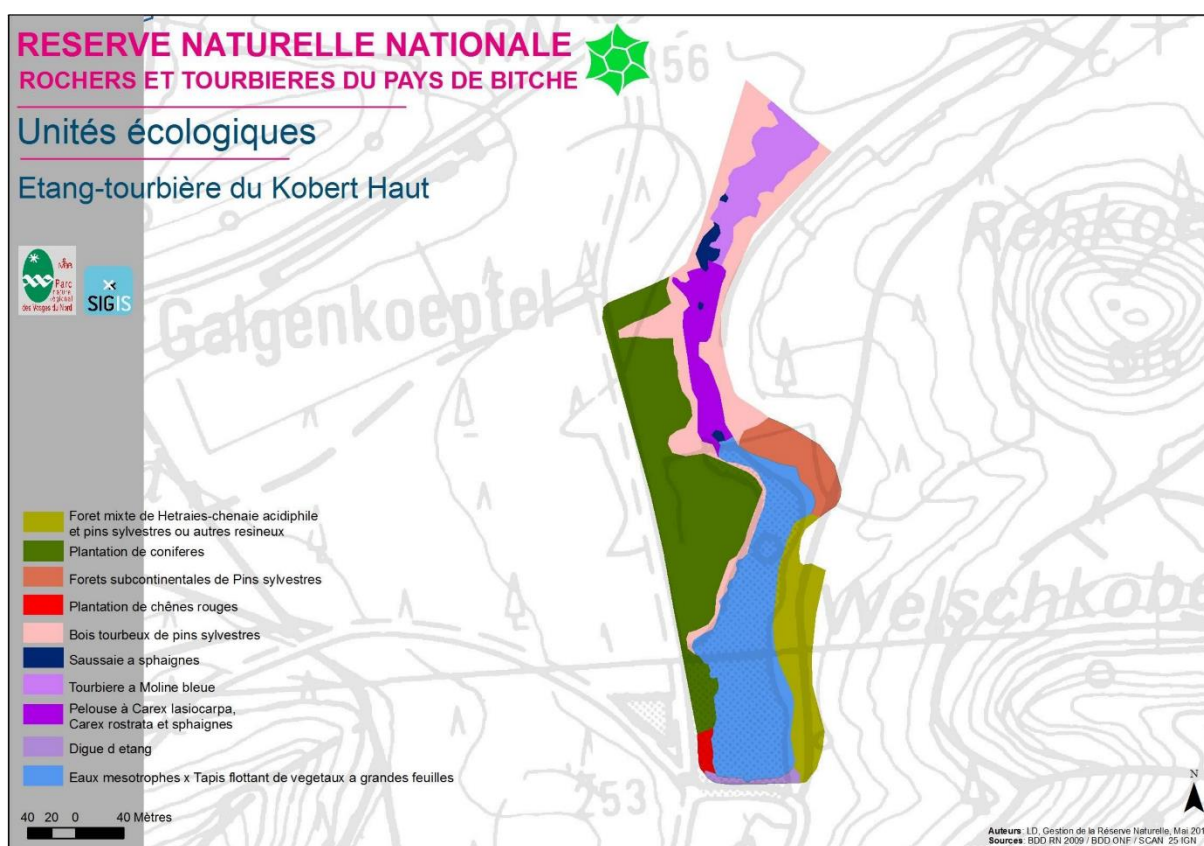


Figure III.2-2: Carte de végétation du site de l'étang-tourbière de Kobert-Haut

L'étang de Kobert-Haut résulte de la construction humaine d'une digue sur le ruisseau du Neudoerferbach mais il est difficile d'estimer sa date de création. En effet, il semble avoir été représenté sur la carte de Cassini mais la précision de celle-ci ne nous permet pas de savoir s'il s'agit réellement de l'étang de Kobert-Haut ou plutôt de celui de Kobert-Bas. En revanche, l'étang apparaît bien sur les cartes d'Etat major (Figure III.2-3).



Figure III.2-3: Présence (?) sur les cartes de Cassini (A) (source : Géoportail, ©CNRS, BNF) et de l'Etat Major (B) (source : Géoportail, ©CNRS, BNF, IGN)

III.2.2. Contexte historique du site de Kobert-Haut

Une des particularités de l'étang-tourbière pour notre étude est sa localisation à 2km de la commune de Sturzelbronn. C'est dans cette commune qu'au XIIème siècle, vers 1135, le duc de Lorraine Simon Ier fonde l'abbaye de Stuzelbronn (Figure III.2-4) où s'installe en 1143, une communauté de moines cisterciens venus de Bourgogne. L'abbaye constitue le berceau du village actuel. Comme nous l'avons déjà abordé (cf. Chapitre I.2.3.2), les moines de cette abbaye vont engager de grands travaux de déboisement ainsi que l'installation de domaines agricoles, composé de fermes, de granges, de terres labourables, de prés et de forêts (Beierlein *et al.* s. d. ; Jehin 2005). Les moines ont également créé de nombreux étangs à vocation piscicoles, servant de réserve de poissons pour l'abbaye ainsi que de source de revenus grâce à leur commercialisation (MATHIS & MATHIS, 2016).

En 1525, lors de la Guerre des Rustauds, l'abbaye va être le lieu de saccages de la part des paysans révoltés défendant la Réforme luthérienne (JACOBS *et al.*, 1990). En 1633, lors de la Guerre de Trente Ans, elle est entièrement détruite par les Suédois. L'abbaye sera reconstruite par la suite mais la Révolution mettra fin à la présence monastique dans la région.



Figure III.2-4 : Portail datant de la reconstruction de l'abbaye de Sturzelbronn au XVIIIème siècle (crédit : camping-muhlenbach.com)

Dans les environs de l'abbaye de Sturzelbronn, il faut mentionner l'existence de moulins, d'une *Pottaschhütte*, ainsi que de deux forges. L'une d'elles, la forge du Grafenweiher, est construite en 1764 par les moines de l'abbaye qui, après sa reconstruction, souhaitent valoriser ses vastes forêts (KRAFT, 2015). Les moines obtiennent l'autorisation de construire un haut-fourneau, un étang, des forges et un martinet ainsi que l'autorisation de creuser des mines de fer dans les forêts de l'abbaye. La forge reçoit même l'affection de 15000 arpents dans les forêts de Bitche (JEHIN, 2005). Mais elle sera abandonnée au Baron Jean de Dietrich qui l'acquiert afin de la détruire, celle-ci réduisant le débit de la Schwartzbach, sur laquelle la forge de Jaegerthal est située en aval de l'étang.

Les forêts de l'abbaye de Sturzelbronn ont également été exploitées pour le bois de Hollande (JEHIN, 2006). On y exploite des pins que les religieux vendent sous forme de planches. En 1781, un rapport sur les bois de marine indique que dans les forêts de Sturzelbronn, les importantes coupes précédentes n'ont laissé que des pins de mauvaise qualité (JEHIN, 2006).

III.2.3. Description de la séquence et chronologie

L'étang-tourbière de Kobert-Haut (KOH) a été sondé en avril 2016. Le sondage, réalisé dans une pelouse à *Carex lasiocarpa*, *C.rostrata* et sphaignes, a livré une séquence de 2 m (Figure III.2-5).

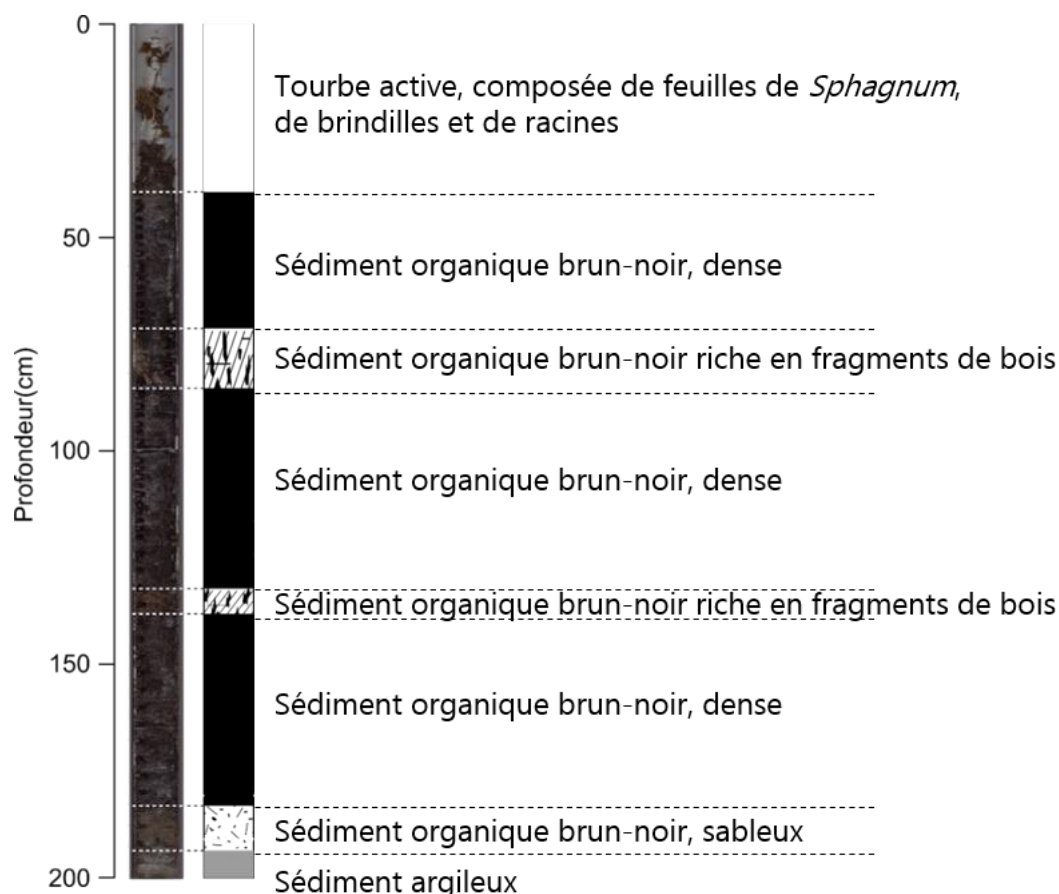


Figure III.2-5 : Photographie et description de la séquence de KOH

Neuf échantillons ont été envoyés pour datation radiocarbone (Tableau III.2-1). Une date a été écartée du modèle âge-profondeur (Poz-103815, 196 cm) car elle fait commencer la séquence autour de 11 000 cal.BP, ce qui est incohérent avec la présence d'*Ulmus*, alors que la végétation des Vosges et du Plateau Lorrain à cette période était constituée de forêts boréales (DE KLERK, 2014 ; RUFFALDI *et al.*, 2015).

Les mesures de ^{210}Pb , d' ^{241}Am et de ^{137}Cs montrent un enregistrement perturbé pour les 30 premiers centimètres, sûrement lié à la présence de tourbe active très morcelée et potentiellement remaniée. Ces données n'ont donc pas été utilisées pour construire le modèle âge-profondeur.

Tableau III.2-1 : Datations radiocarbone de la séquence de KOH. Les dates en grisé ont été écartées du modèle âge-profondeur.

ID laboratoire	Profondeur (cm)	Type d'échantillon	Age ¹⁴ C BP	Age cal. BP (2σ)	Age cal. BC/AD (2σ)
Poz-96855	43	Restes végétaux	1010±30	977 - 826	AD 973 - 1125
Poz-109249	55	Sédiment total	2315 ± 30	2363 - 2306	BC 414 - 357
Poz-98165	60	Restes végétaux	2820±35	3038 -2845	BC 1089 - 896
Poz-109252	65	Sédiment total	2865 ± 30	3072 - 2879	BC 1192 -938
Poz-96856	87	Charbon	2940±35	3183 - 2976	BC 1234 -1027
Poz-96858	120	Restes végétaux	4470±35	5290 - 5028	BC3341 -3079
Poz-103814	144	Restes végétaux	5780±40	6671 - 6483	BC 4722 -4534
Beta-507035	194	Restes végétaux	8750±30	9900 - 9603	BC 7942 -7654
Poz-103815	196	Restes végétaux	9730±50	11244 - 11079	BC 9295 -9130

Le modèle âge-profondeur de Kobert-Haut couvre presque l'intégralité de l'Holocène à partir de 10 000 cal.BP jusqu'au présent (Figure III.2-6.A). Les 120 cm du bas et les 50 cm du haut ont respectivement des taux d'accumulation de 0,15 et 0,2 mm.an⁻¹ (Figure III.2-6.B).

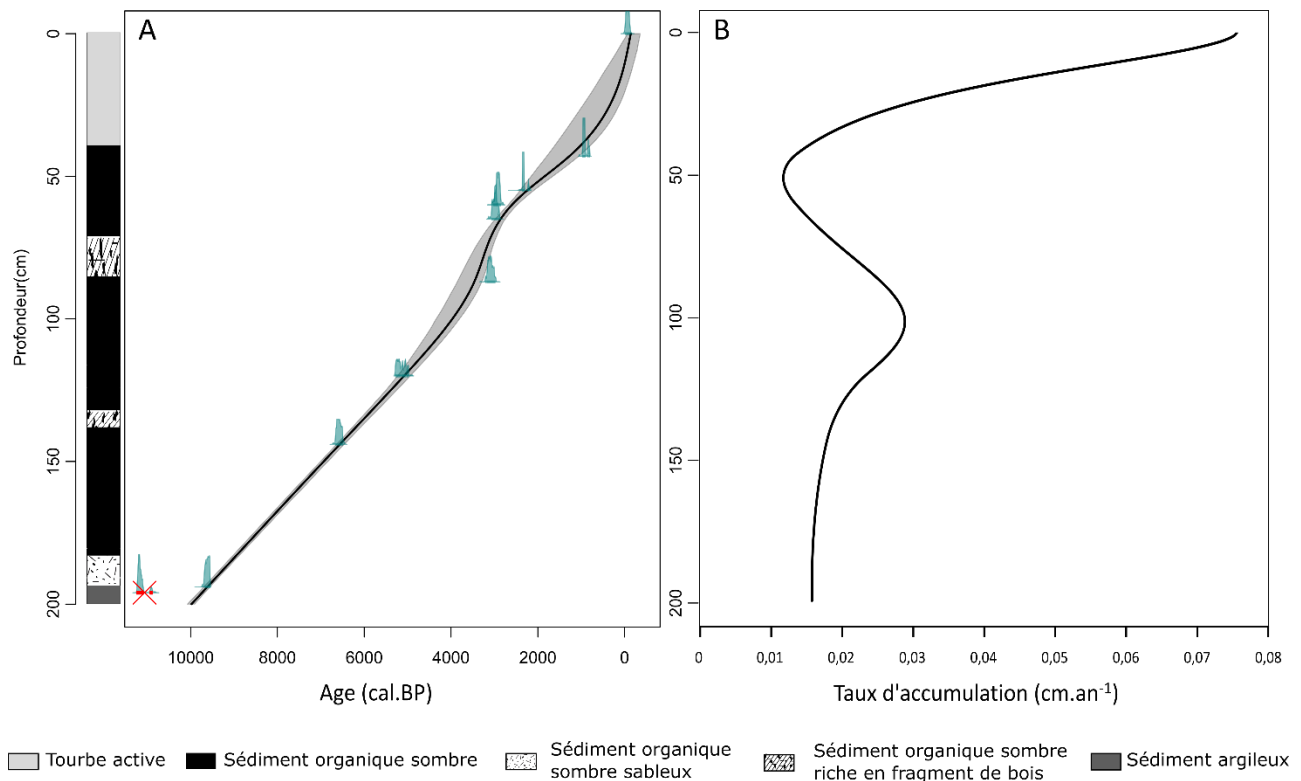


Figure III.2-6 : Modèle âge-profondeur de la séquence de KOH (A) et évolution du taux d'accumulation (B)

Une accélération de l'accumulation est observée entre 3180 et 2300 cal.BP, soit entre 120 et 50 cm, période pour laquelle le taux atteint 0,4 mm.an⁻¹.

III.2.4. Résultats

Les résultats sont présentés sur les diagrammes III.2-7 (p. 155), III.2-8 (p. 157) et III.2-9 (p. 159) et les principaux résultats sont résumés dans les tableaux III.2-2 (p. 163) et III.2-3 (p. 164).

III.2.4.1. Description des résultats

- LPAZ KOH1

La première zone pollinique de la séquence est marquée par la dominance des pollens de *Corylus* et *Pinus* et par un très fort pourcentage des pollens arboréens (95%). Les pollens de *Quercus*, *Ulmus*, *Tilia* et *Fraxinus* sont présents et leurs pourcentages sont en augmentation. Les taxons herbacés sont donc très rares et dominés par les pollens de Poaceae, accompagnés de ceux de quelques autres taxons, essentiellement les Anthemideae, *Rumex* et *Calluna*. Les pollens de *Fagus* sont enregistrés sporadiquement dans cette zone. Le dernier tiers de la zone enregistre une chute des pourcentages des pollens de *Corylus* alors que ceux des éléments de la chênaie diversifiée augmentent.

La végétation locale est dominée par *Betula*, accompagné par *Salix*, et temporairement par *Alnus*. Le cortège des herbacées est dominé par les pollens des Cyperaceae et des Poaceae. Les taxons mésohygrophiles sont également présents et représentés par les pollens de *Filipendula* et sporadiquement par ceux de *Lysimachia* qui apparaissent au milieu de la zone. Les spores de *Sphagnum* sont présentes en nombre important, bien que celui-ci fluctue le long de la zone et fini par diminuer. À la fin de la zone, les pourcentages des pollens d'*Alnus* augmentent fortement et ceux de *Salix* diminuent.

Les analyses des MNP et des μ PC n'ont pas été menées pour cette zone pollinique. En revanche, l'analyse des MPC montre un pic significatif du taux d'accumulation des macroparticules carbonisées dans la deuxième moitié de la zone.

La base de la zone 1 est caractérisée par une importante fraction minérale dans le sédiment (85-97%), qui chute dans la deuxième moitié (16% à la fin de la zone).

- LPAZ KOH2a

La deuxième zone débute par une légère diminution des pourcentages des pollens d'arbres, synchrone d'une augmentation de ceux des céréales et de plusieurs IPA (*Papaver*, Anthemideae) et de ceux de *Calluna*, qui augmentent pour toute la zone. Globalement, au cours de la zone, les pourcentages des pollens de *Corylus* et d'*Ulmus* régressent alors que ceux de *Quercus* augmentent. Les pourcentages des pollens de *Tilia* et *Fraxinus* restent stables et ceux de *Pinus* oscillent autour de 40%. La courbe pollinique continue de *Fagus* débute au début de la zone alors que les premiers pollens d'*Abies* et de *Picea* sont identifiés. À la fin de la zone, les pourcentages des pollens de *Fagus* et d'*Abies* commencent à augmenter.

Cette zone est caractérisée par la très forte augmentation des pourcentages polliniques d'*Alnus* et les pourcentages des pollens de *Frangula* et des Rosaceae arborescents augmentent également dans la deuxième moitié de la zone. Parmi les taxons herbacés, les pourcentages des pollens des Cyperaceae et des Poaceae diminuent légèrement alors que ceux de *Lysimachia* augmentent. Le nombre des spores de *Sphagnum* est plus bas que dans la zone précédente.

La perte au feu montre une tendance à la diminution des pourcentages de la fraction minérale dans le sédiment et l'analyse des MPC montre deux très légères augmentations de leur taux d'accumulation dans la seconde moitié de la zone. L'analyse des MNP montre que de très nombreux types sont enregistrés dans cette zone, dont les principaux sont le type HdV 61, HdV 27, HdV 112, HdV 18, TM 4009 et HdV 55.

- LPAZ KOH2b

La transition zones 2a/2b est marquée par la valeur maximale des pourcentages polliniques de *Quercus* (33%). La zone 2b est caractérisée par une importante augmentation des pourcentages des pollens de *Fagus* et d'*Abies*, alors que ceux de tous les autres taxons arboréens diminuent, à l'exception de ceux de *Pinus* qui oscillent entre 45 et 55%. Les premiers pollens de *Carpinus* sont identifiés dans cette zone et la courbe continue de ce taxon débute à la fin de la zone. Les pourcentages des pollens des taxons herbacés restent encore très limités même si trois augmentations de ceux des Poaceae sont observées, synchrones de brèves diminutions des pourcentages des pollens d'arbres, et que de nombreux pollens d'IPA sont également enregistrés. Deux pollens de *Vitis* sont identifiés au cours de la zone.

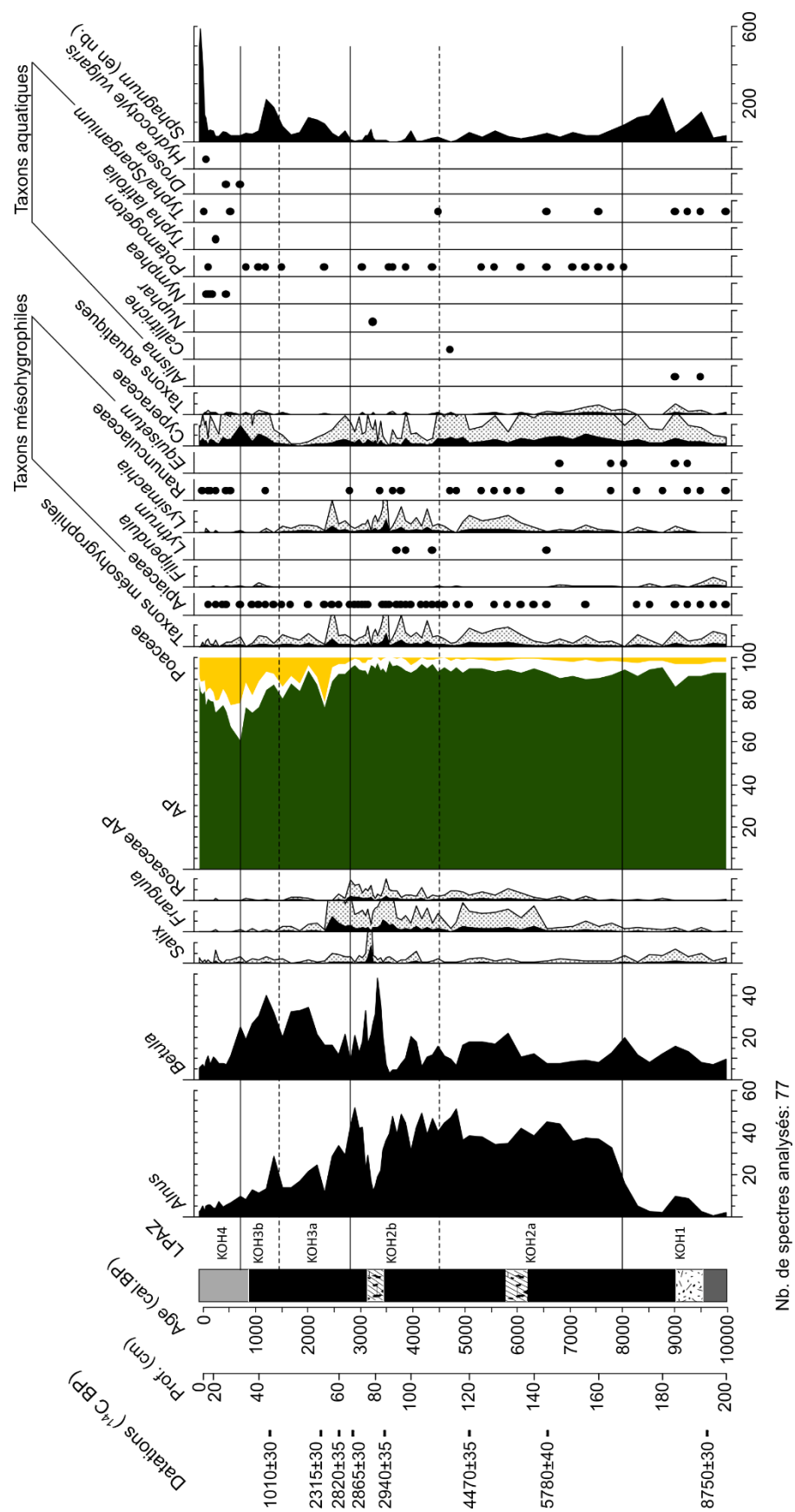


Figure III.2-8: Diagramme pollinique de la végétation locale autour du site de KOH. LPAZ: local pollen assemblage zone, AP: arboreal pollen. (analyses : E.Gouriveau, P.Ruffaldi)

L'enregistrement de la végétation locale est marqué par une chute des pourcentages des pollens d'*Alnus* dans la seconde moitié de la zone, alors qu'à l'inverse, ceux de *Betula* augmentent. Les pollens de *Salix* sont également un peu mieux représentés dans cette zone. Les pollens de Cyperaceae se raréfient, tout comme les spores de *Sphagnum* et les pollens des taxons aquatiques.

Les valeurs de la fraction minérale présente dans le sédiment sont les plus faibles de la séquence (<10%). Les concentrations des μ PC montrent quelques petits pics alors que les taux d'accumulation des MPC augmentent au début et à la fin de la zone de manière importante et enregistrent deux autres petites augmentations. Les concentrations des spores des MNP qui dominaient la zone précédente tendent à diminuer alors que celles des types HdV 360, HdV 16 et HdV 172 augmentent.

- LPAZ KOH3a

Les pourcentages des pollens d'arbres diminuent à plusieurs reprises, principalement ceux de *Pinus*, *Corylus* et *Fagus*, ainsi que ceux d'*Ulmus*, *Tilia* et *Fraxinus* qui se maintiennent à de faibles valeurs. Les pourcentages des pollens de *Quercus*, affectés par la première chute des pourcentages des pollens arboréens, augmentent ensuite à partir du milieu de la zone. Parmi les taxons herbacés, les pourcentages polliniques des Poaceae augmentent fortement, accompagnés par ceux de *Cerealia*-type. La courbe pollinique de *Plantago lanceolata* devient continue à partir du milieu de la zone. Les valeurs des pourcentages des pollens de *Calluna* et des Ericaceae augmentent également. Deux pollens de *Vitis* sont identifiés dans la seconde moitié de la zone et les premiers pollens du type *Secale* sont identifiés à la fin de la zone. Le nombre de spores monolètes diminue également.

La végétation locale est marquée par la diminution progressive des pourcentages des pollens d'*Alnus* et l'augmentation de ceux de *Betula*, qui diminuent ensuite également à la fin de la zone. Les pourcentages polliniques de *Salix*, *Frangula*, des Rosaceae arborescents et de *Lysimachia* chutent dans cette zone et ces taxons ne sont plus que rarement identifiés dans les niveaux supérieurs. Il en est de même pour les pourcentages des pollens des Cyperaceae qui connaissent en revanche un début d'augmentation à la fin de la zone. Le nombre de spores de *Sphagnum* augmente dans la première moitié de la zone pour ensuite diminuer à nouveau.

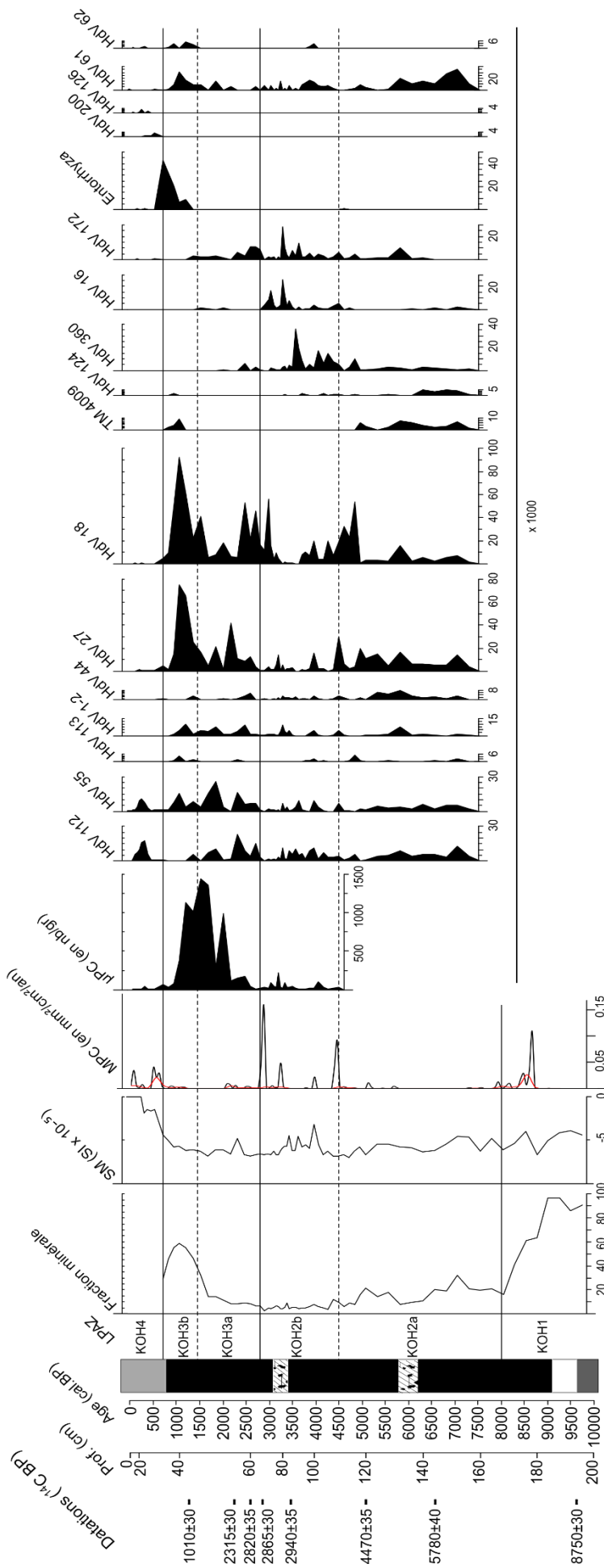


Figure III.2-9 : Résultats simplifiés de la perte au feu, de la susceptibilité magnétique (SM), ainsi que des comptages des micro-particules carbonisées (μPC), l'analyse des macro-particules carbonisées (MPC) et les concentrations des spores de microfossiles non-polliniques pour la séquence de KOH (analyses : E.Gouriveau, analyses MPC : V.Robin)

Dans cette zone, le pourcentage de matière minérale dans le sédiment augmente, avec une accélération de cette augmentation à la fin de la zone. Le comptage des μ PC montre une importante augmentation de leur concentration, avec un premier pic assez limité puis deux pics plus importants, le dernier atteignant la valeur maximale de toute la séquence. L'analyse des spores de MNP montre un assemblage assez similaire à celui de la zone 2a car les concentrations des types de la zone 2a augmentent à nouveau, notamment HdV 27 et HdV 18, alors que celles des types présents dans la zone précédente déclinent.

- LPAZ KOH3b

Le début de la zone est caractérisé par la rapide chute des pourcentages des pollens de *Pinus*, alors que ceux de *Quercus* augmentent tout aussi rapidement, accompagnés plus modestement par ceux de *Fagus* et de *Corylus*. Très rapidement, les pourcentages de ces taxons diminuent à nouveau et ceux de *Pinus* tendent à réaugmenter. Le nombre des spores monolètes diminue tout au long de la zone. Parmi les taxons herbacés, les pourcentages des pollens des Poaceae augmentent le long de la zone et ceux des céréales (*Cerealia*-type et *Secale*-type) s'intensifient. De même, les courbes des pourcentages polliniques de tous les IPA montrent une augmentation, caractérisée principalement par la hausse des pourcentages des pollens de *Plantago lanceolata*. Une phase d'intensification des pourcentages des pollens de *Cannabis/Humulus* est observée au milieu de la zone alors que ceux de *Calluna* augmentent pour toute la durée de la zone. Quelques pollens de *Juglans* apparaissent également dans la deuxième moitié de la zone.

Les pourcentages des pollens d'*Alnus* continuent de régresser le long de cette zone, tout comme ceux de *Betula* qui, après avoir atteint un maximum, régressent également. À l'inverse, l'augmentation des pourcentages des pollens des Cyperaceae, amorcée à la zone précédente, continue jusqu'à atteindre la valeur maximale de la séquence à la fin de la zone. Le nombre des spores de *Sphagnum* diminue fortement après avoir été comptées en grande quantité à la base de la zone.

Le pourcentage de matière minérale dans le sédiment continue d'augmenter et atteint environ 60% avant de commencer à diminuer. Pour le sommet de la séquence, les analyses de perte au feu n'ont pas pu être menées sur les 34 premiers centimètres qui étaient constitués uniquement de tourbe active. Les valeurs de la susceptibilité magnétique augmentent

également le long de la zone. Dans cette zone, les concentrations des μ PC chutent jusqu'à des valeurs semblables à celles observées dans la zone 2b. Les concentrations de la plupart des types de MNP déclinent, voire disparaissent dans cette période, à l'exception des types HdV 27 et HdV 18 qui atteignent leur valeur maximale. De même, le type TM 4009, présent uniquement à la zone 2a réapparaît et les concentrations des spores d'*Entorrhiza* qui apparaissent dans cette zone, atteignent un maximum à la fin de la zone.

- LPAZ KOH4

Cette dernière zone est caractérisée par la très forte augmentation des pourcentages des pollens de *Pinus* et de *Picea*. Tous les autres taxons voient leur pourcentage pollinique se stabiliser à des pourcentages inférieurs à 10%. Quelques pollens de *Castanea* apparaissent dans la deuxième moitié de la zone. À l'inverse de l'augmentation des pourcentages de pollens arboréens, ceux de tous les taxons herbacés déclinent : les Poaceae, *Cerealia*-type, *Secale*-type, qui disparaît quasiment, ainsi que la plupart des IPA et *Calluna*. Deux pollens de *Vitis* sont identifiés au tout début de la zone.

Les pourcentages des pollens d'*Alnus* et de *Betula* régressent toujours, tout comme ceux des Cyperaceae. En revanche, les pollens de taxons aquatiques se font plus fréquents dans cette zone, tout comme les spores de *Sphagnum* qui connaissent une très forte augmentation de leur nombre en surface. Des pollens de *Drosera* et d'*Hydrocotyle* sont également identifiés.

Les valeurs de la susceptibilité magnétique augmentent toujours et se stabilisent à des valeurs proches de zéro au sommet de la séquence. Les concentrations de μ PC restent faibles alors que les analyses des MPC montrent plusieurs petites augmentations de leur taux d'accumulation. L'assemblage des MNP est très réduit dans cette zone qui n'enregistre qu'une phase d'augmentation des concentrations des type HdV 112 et HdV 55, ainsi que l'apparition des spores des types HdV 200 et HdV 126.

III.2.4.2. Commentaires

La comparaison des courbes des pourcentages polliniques avec celles des concentrations polliniques ne semble pas montrer de problème majeur de biais de conservation (Figure III.2-10).

Les données XRF obtenue sur la séquence de KOH ne sont visiblement pas exploitables. Tout d'abord, les mesures n'ont pas pu être réalisées sur les 40 premiers centimètres constitués majoritairement de tourbe active morcelée. De plus, les courbes ne présentent pas de variations marquées des valeurs en éléments chimiques qui puissent être interprétées. Ces données ont donc été écartées et ne seront pas discutées par la suite.

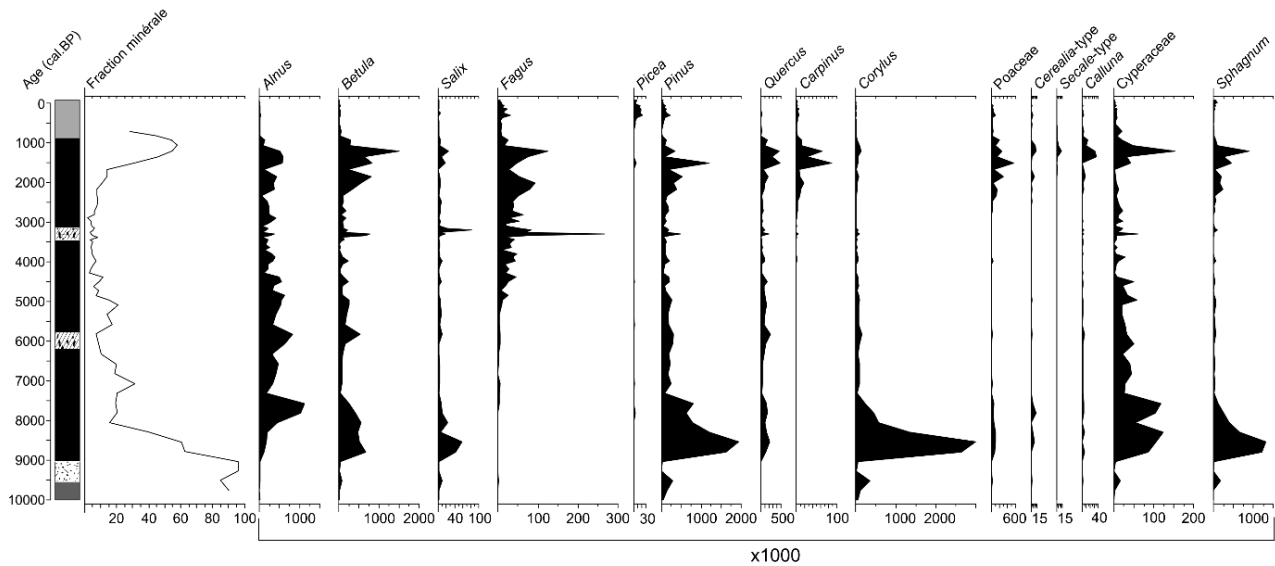


Figure III.2-10: Quelques taxons polliniques présentés en concentration (nb/g de sédiment)

Bornes en cal.BP (profondeur) LPAZ	Essences dominantes	Végétation forestière	NAP, céréale, IPA	PAF, SM, μ PC
-65 (6) KOH4	<i>Pinus</i> - <i>Quercus-Fagus</i>	- \uparrow AP -530 cal.BP: \uparrow <i>Pinus</i> et <i>Picea</i> - \uparrow <i>Castanea</i>	- \downarrow Poaceae et céréales -2 pollen de <i>Vitis</i> identifiés -530 cal.BP: max. IPA (5,2%) puis \downarrow -720 cal.BP: \downarrow <i>Calluna</i> - \uparrow Poaceae	- μ PC très rares - \uparrow SM
700 (34cm)	<i>Quercus</i> (- <i>Fagus</i>) - <i>Pinus</i>	-720 cal.BP: mini. AP (47%) puis \uparrow -1355 cal.BP: mini. <i>Pinus</i> (11%), max. <i>Quercus</i> (37,5%) -1515-1070 cal.BP: \uparrow <i>Corylus</i> - \downarrow <i>Quercus</i> -apparition de <i>Juglans</i>	-courbe continue des céréales - \uparrow IPA (<i>Artemisia</i> , Chenopodiaceae, Anthemideae, <i>Plantago lanceolata</i>) - \downarrow spores monolètes -1355 cal.BP: \uparrow <i>Calluna</i> -720 cal.BP: max. Poaceae (40%) -1070 cal.BP: max. céréales (3%) -1355-940 cal.BP: phase à <i>Cannabis/Humulus</i>	-1070 cal.BP: max. fraction minérale (58%) puis \downarrow -1210 cal.BP: pic de μ PC puis \downarrow - \uparrow SM
1450 (45cm)		- \downarrow AP - \downarrow <i>Fagus</i> - \uparrow <i>Carpinus</i> -1515 cal.BP: \downarrow <i>Pinus</i> -2595 et 2325 cal.BP: \uparrow <i>Quercus</i>	-1845 cal.BP: pic de Poaceae (25%), bref pic de céréales et IPA (<i>Artemisia</i> , Chenopodiaceae, <i>Plantago lanceolata</i>) -2170 cal.BP: \uparrow <i>Calluna</i> et spores trilètes -2325 cal.BP: 1er max. Poaceae (30%) -2470 cal.BP: \uparrow céréales (1%) -2 pollens de <i>Vitis</i> identifiés	- \uparrow fraction minérale -1515 cal.BP: max. de μ PC -2010 cal.BP: pic de μ PC -2710 cal.BP: \uparrow μ PC
2800 (64cm)	<i>Pinus</i> - <i>Quercus-Fagus</i>	- \uparrow <i>Fagus</i> et <i>Abies</i> - \downarrow <i>Ulmus</i> , <i>Tilia</i> , <i>Fraxinus</i> , <i>Corylus</i> et <i>Quercus</i> - \downarrow présence sporadique de <i>Picea</i> et <i>Carpinus</i> -2900 cal.BP: courbe continue de <i>Carpinus</i> -3970, 3435 et 3040 cal.BP: brèves \downarrow AP -4490 cal.BP: pic de <i>Quercus</i> (30%) -4490 cal.BP: \uparrow <i>Fagus</i>	-2980 cal.BP: \uparrow Poaceae -3970, 3435 et 3040 cal.BP: brèves \uparrow Poaceae et IPA (Urticaceae, <i>Plantago lanceolata</i>)	-fraction minérale faible (5%) -4065 et 3200 cal.BP: pic de μ PC
4500 (110cm)	<i>Pinus</i> - Chênaie diversifiée - <i>Corylus</i>	-apparition sporadique d' <i>Abies</i> et <i>Picea</i> - \downarrow <i>Ulmus</i> et <i>Corylus</i> et \uparrow <i>Quercus</i> -4960 cal.BP: \uparrow <i>Fagus</i> et <i>Abies</i> -7550 cal. BP: courbe continue de <i>Fagus</i>	-Poaceae <10% - \uparrow céréales, <i>Papaver</i> , Anthemideae et <i>Calluna</i>	- \downarrow fraction minérale
8000 (168cm)	<i>Corylus</i> - <i>Pinus</i>	-7800 cal. BP: \uparrow <i>Fraxinus</i> -8285 cal. BP: \uparrow <i>Tilia</i> -8530 cal. BP: \downarrow <i>Corylus</i> -9015 cal.BP: mini. <i>Pinus</i> (30%)	-Poaceae <10% -présence d' <i>Artemisia</i> , Anthemideae	-9015 cal.BP: \downarrow fraction minérale (de 95% à 16% vers 8040cal.BP)

Tableau III.2-2 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de KOH, concernant les enregistrements extra-locaux à régionaux (pollens, XRF, μ PC) ainsi que la perte au feu (PAF) et la susceptibilité magnétique (SM). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, IPA : indices polliniques d'anthropisation, \uparrow : augmentation, \downarrow : diminution, max. : valeur maximale

Bornes en cal.BP (profondeur) LPAZ	Essences dominantes	AP	NAP	Spores de champignons coprophiles	MPC
-65 (6)	NAP	-↓ <i>Alnus</i> et <i>Betula</i>	-300 cal.BP: ↑ <i>Sphagnum</i> -↓Cyperaceae -apparition de rares aquatiques (<i>Nymphaea</i> , <i>Typha/Sparganium</i> , <i>Typha latifolia</i>) -quelques rares pollen de <i>Drosera</i> et <i>Hydrocotyle vulgaris</i>	-MNP très rares -pic HdV112 et HdV55 -apparition des types HdV200 et HdV126	-60 et 490 cal.BP: pics des MPC
6700 (34cm)	<i>Betula</i> - NAP	-↓ <i>Alnus</i> et <i>Betula</i>	-↑Cyperaceae -720 cal.BP: max. Cyperaceae -1210 cal.BP: pic de <i>Sphagnum</i> puis ↓ -1515 cal.BP: quasi disparition de <i>Lysimachia</i>	-↑HdV27, HdV18, TM4009, <i>Entorrhiza</i> -↓des autres MNP	
1450 (45cm)	<i>Betula</i> - (<i>Alnus</i>)	-↓ <i>Alnus</i> -↑ <i>Betula</i> -2470 cal.BP: quasi disparition de <i>Salix</i> et <i>Frangula</i>	-1845 cal.BP: ↑Cyperaceae -2170 cal.BP: pic de <i>Sphagnum</i> -2470 cal.BP: ↓ <i>Lysimachia</i> -2710 cal.BP: pic de Cyperaceae puis ↓	-↑HdV112, HdV55, HdV1-2, HdV27, HdV18 -↓HdV360, HdV16, HdV172	
2800 (64cm)	<i>Alnus</i> - (<i>Betula</i>)	-2900 cal.BP: pic d' <i>Alnus</i> , puis ↓ -3200 cal.BP: pic de <i>Salix</i> -3250 cal.BP: mini. <i>Alnus</i> -3335 cal.BP: max. <i>Betula</i> -3630 cal.BP: ↓ <i>Alnus</i>	-3490 cal.BP: pic de <i>Lysimachia</i> (5,5%) -courbe discontinuée de <i>Sphagnum</i> -faible valeur de Cyperaceae	-↑HdV360, HdV16, HdV172 -↓des autres MNP	-2870, 3230, 3965 et 4450 cal.BP: pics des MPC
4500 (110cm)					
KOH2a	<i>Betula</i> (<i>Salix</i> , <i>Alnus</i>)	-↑ <i>Alnus</i> -6315-4960 cal.BP: ↑ <i>Betula</i> et <i>Frangula</i>	-6315 cal.BP: ↑ <i>Lysimachia</i> -7305 cal.BP: pic de Cyperaceae puis ↓	-présence de nombreux types de MNP: HdV61, HdV27, HdV18, HdV112, HdV55, HdV44, TM4009	-5125 et 5670 cal.BP: pics des MPC
8000 (168cm)		-8530 cal.BP: ↑ <i>Alnus</i>	-8770 cal.BP: ↓ <i>Sphagnum</i> -9260 cal.BP: ↑ <i>Lysimachia</i>	n.a.	-8660 cal.BP: pic des MPC

Tableau III.2-3 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de KOH, concernant les enregistrements locaux (pollens, MNP, MPC, graines). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, ↑ : augmentation, ↓ : diminution, max. : valeur maximale, mini. : valeur minimale

III.3. L'étang-tourbière de Waldeck (WAL)

III.3.1. Localisation et végétation actuelle

L'étang-tourbière de Waldeck (Figure III.3-1) se situe 2 km à l'est de la commune d'Eguelshardt dans le département de la Moselle (49°01.287'N 7°31.392'E) et à environ 8 km au sud-est de Bitche, à une altitude de 253 m (Figure III.1). L'étang a été implanté en barrage dès la source du ruisseau du Waldeck, affluent du Falkensteinerbach. La surface de l'étang-tourbière est estimée d'environ 4.88 ha. L'étang-tourbière est classé depuis 1983 et fait de nos jours partie de la Réserve Naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche (Figure I.1-8). La surface du bassin versant alimentant l'étang-tourbière, délimité par SIG (QGIS outil SAGA), a été approximativement estimée à 128.4ha et s'étend au nord de la zone humide (Figure III.3-1.A). Le bassin versant est entièrement constitué de Grès vosgien inférieur (t1b) (Figure I.1-5) (BLANALT *et al.*, 1967).

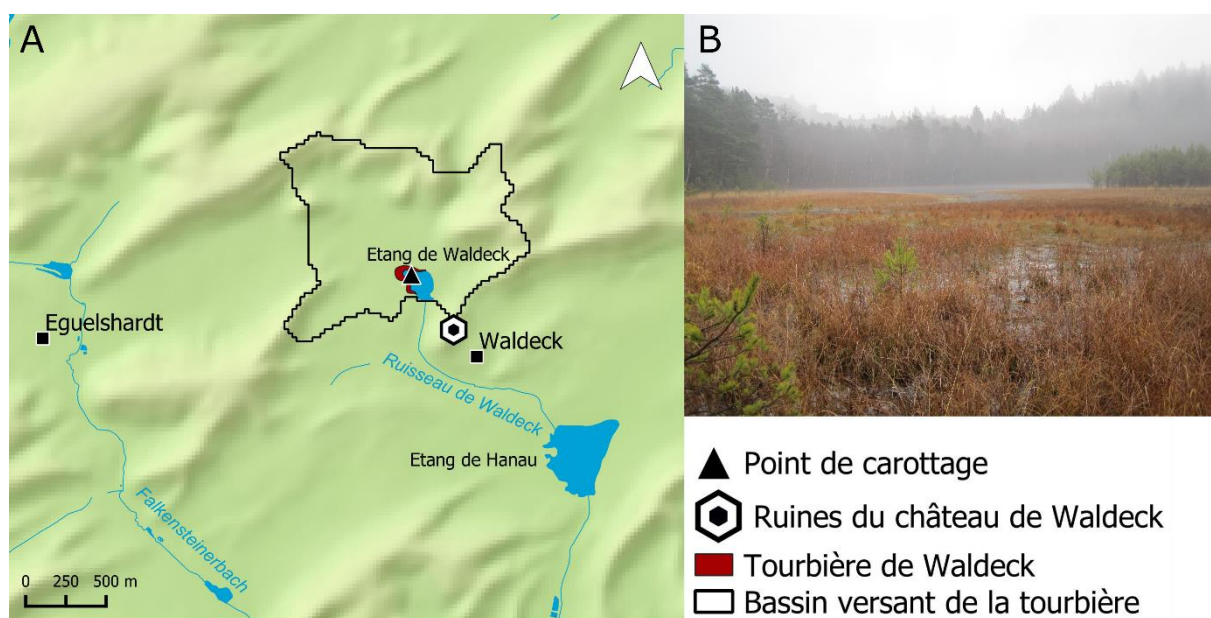


Figure III.3-1 : Localisation de l'étang-tourbière de Waldeck et son bassin versant (A) (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN) et photographie du site de prélèvement (B) (cliché : E. Gouriveau)

L'étang de Waldeck recouvre en partie un vallon tourbeux divisé, en amont, en deux micros vallons tourbeux. L'étang subit un marnage saisonnier très marqué du fait qu'il n'est alimenté que par des sources à débit variable selon la saison et l'année. L'étang subit actuellement une dynamique d'atterrissement. La tourbière de Waldeck s'étend ainsi en queue d'étang. La végétation actuelle s'organise en cercles concentriques autour de l'étang (Figure III.3-2). On y trouve principalement sur ses berges, un gazon amphibie d'*Eleocharis multicaulis* (rattaché au code EUNIS C3.4131), ponctué de gazons à *Carex lasiocarpa*, *C. rostrata* et sphaignes (EUNIS D2.312). Se succèdent ensuite vers la périphérie, une communauté végétale des tourbes et des sables humides, ouverts et acides, avec *Rhynchospora alba*, *R. fusca* et *Drosera intermedia* (EUNIS D2.3H), une lande humide à *Molinia caerulea* (EUNIS F4.13), puis une pinède tourbeuse à *Pinus sylvestris* hercynienne (EUNIS G3.E22). On trouve aussi en amont, dans d'anciens fossés en partie comblés, des communautés se rapprochant des radeaux de *Sphagnum* sp. et d'*Eriophorum angustifolium* (EUNIS D2.38) et, sur une berge, au niveau d'une source latérale, un fragment d'aulnaie marécageuse sur tourbe acide (EUNIS G1.52).

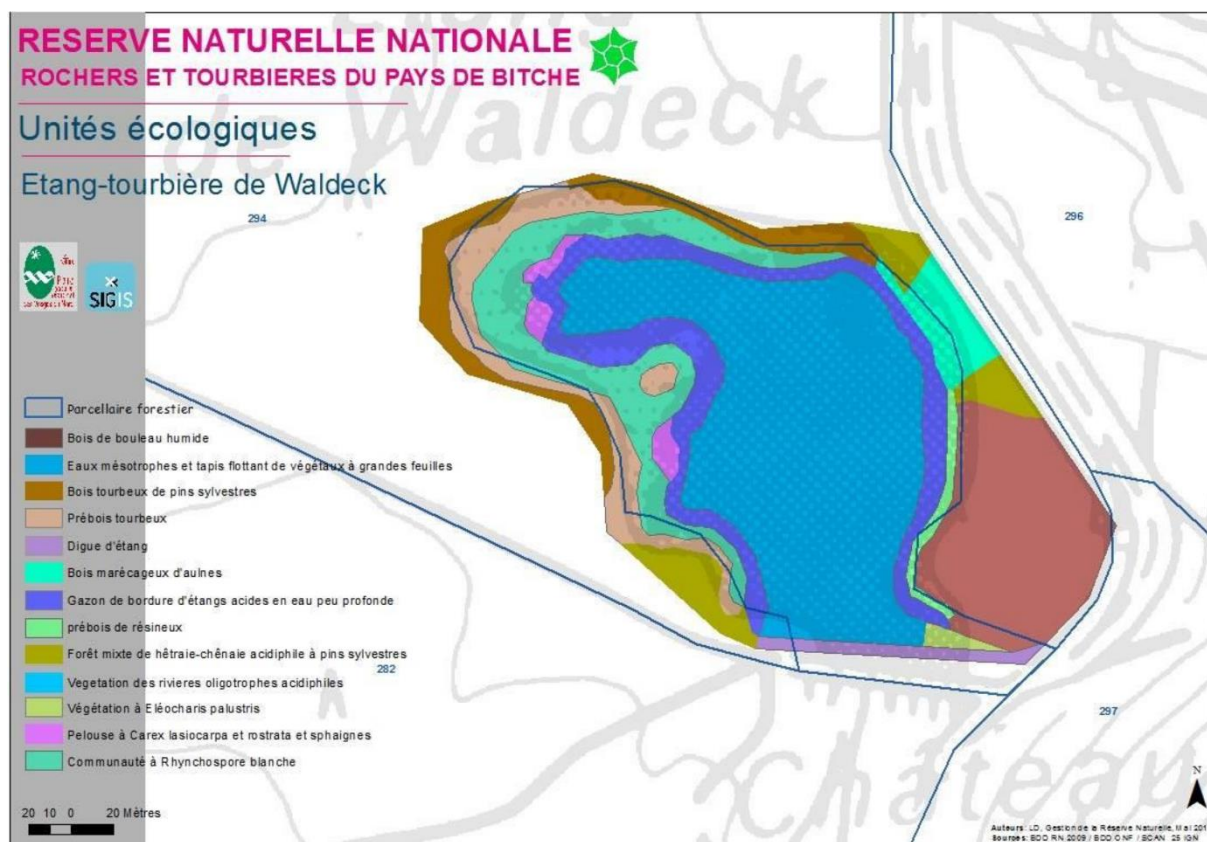


Figure III.3-2: Carte de la végétation de l'étang-tourbière de Waldeck.

L'étang de Waldeck apparaît sur les cartes de l'Atlas topographique du Comté de Bitche (1758) (Figure III.3-3), mais comme il n'apparaît pas sur les cartes antérieures au XVIIIème siècle, on peut donc dire que la création de cet étang date sûrement du XVIIIème siècle.

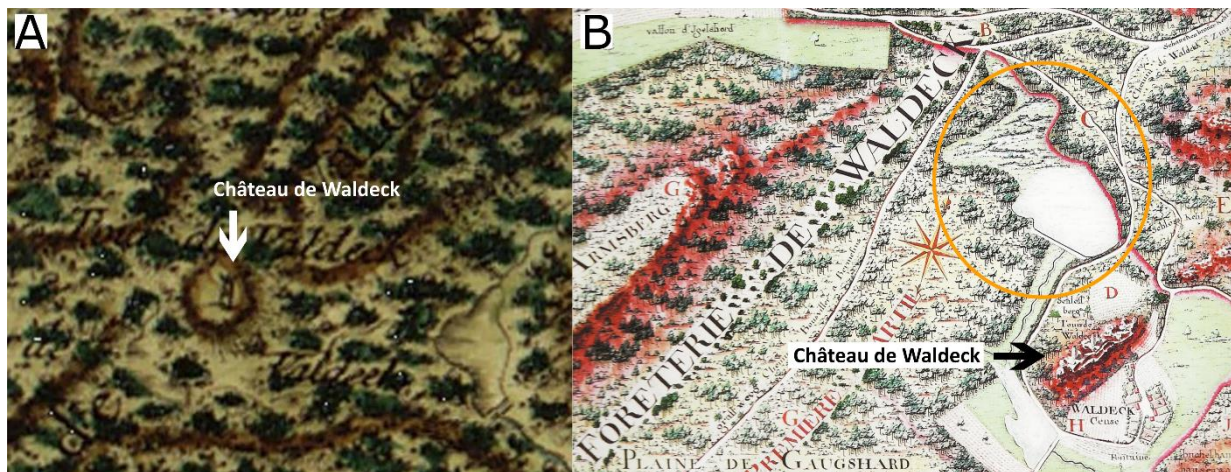


Figure III.3-3: Absence de l'étang de Waldeck sur la carte de Cassini (A) (source : Géoportail, ©CNRS, BNF) et sa représentation sur l'Atlas topographique du Comté de Bitche (B).(source : Géoportail, ©CNRS, BNF, IGN)

III.3.2. Contexte historique du site de Waldeck

L'étang-tourbière s'étend au pied des ruines du château de Waldeck (Figure III.3-4).



Figure III.3-4: Localisation des ruines du château de Waldeck, surplombant l'étang-tourbière du même nom (cliché : E. Gouriveau).

Ce château, construit sur trois rochers, date du XIII^{ème} siècle. Il est probablement déjà mentionné en 1227 sous le nom de *Waldescke*, appartenant alors aux comtes de Leiningen (RUDRAUF, 2008). Il passe en suite aux mains des comtes de Lichtenberg (en 1335). Ce château, de type troglodytique comporte des escaliers et des chambres taillées à même le grès dont une salle troglodytique dont la voute est soutenue par un seul pilier (Figure III.3-5.A) (MENGUS, 2009 ; RUDRAUF, 2009, 2008 ; TRENDL & BARABINOT, 1999).

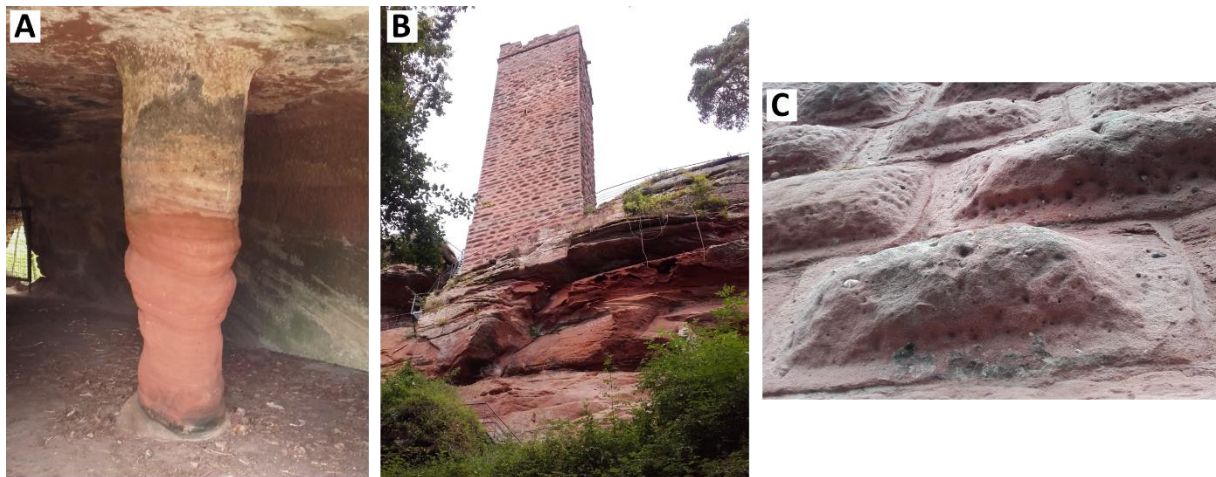


Figure III.3-5: Pilier de grès de la salle troglodyte du château de Waldeck (A), son donjon (B) et les pierres de taille à bossage (C) (clichés : E. Gouriveau)

Deux donjons étaient présents, dont il n'en reste plus qu'un de nos jours. Celui-ci, construit en grès, montre l'utilisation de pierres de taille à bossage et conserve une partie du crénelage (Figure III.3-5.B et C) (MENGUS, 2009). Ces donjons pouvait servir d'habitation comme semblent l'indiquer les deux niveaux supérieurs, voûtés en croisées d'ogives (TRENDL & BARABINOT, 1999). Les autres vestiges présents sur le site du château de Waldeck sont deux citernes et un puits, répartis dans la basse-cour, qui s'étend du côté est, en contrebas de la tour (MENGUS, 2009 ; TRENDL & BARABINOT, 1999). Dans un acte de cession rédigé en 1445, le château de Waldeck est cédé avec ses dépendances, à savoir : ses forêts, pâturages, chasse, pêche, labours, prés, étangs, droits et terres. Les documents des XIV^{ème} et XV^{ème} siècles indiquent que des étangs faisaient partie du fief castral et étaient utilisés pour la pisciculture (TRENDL & BARABINOT, 1999).

Le château de Waldeck est mentionné comme étant en ruine dès 1594, mais il sera tout de même démantelé en 1635 pendant la Guerre de Trente Ans, par les Français (MENGUS, 2009 ; RUDRAUF, 2008).

En 1754, une grande inspection des forêts du Pays de Bitche note la dominance du chêne, soit en peuplement pur, soit mélangé au pin ou au hêtre dans la foresterie de Waldeck (JEHIN, 2005). Les rochers inaccessibles de la foresterie ont leur sommet recouvert de callune. Toujours à cette époque, les inspecteurs notent qu'au pied des vestiges du château de Waldeck, en bordure de l'étang, une « clairière considérable » est déjà défrichée (JEHIN, 2005).

La cense de Waldeck ne deviendra un village qu'au XVIIIème siècle (Figure III.3-6). À cette époque, de nombreuses activités se développent le long du ruisseau du Falkensteinerbach (scieries, forges, papeteries, moulins) (JACOPS *et al.*, 1990). La foresterie de Waldeck a été exploitée pour les activités industrielles et de construction. Par exemple, les pins qui poussent dans une partie de cette forêt sont envoyés en Hollande pour la construction navale (JEHIN, 2006). Cependant, en 1781, la forêt de pin est décrite comme épuisée. En 1774, un arrêt oblige la vente annuelle de 100 pins de la foresterie de Waldeck, soit aux enchères, soit à la verrerie royale de Saint-Louis (JEHIN, 2005).



Figure III.3-6: Hameau de Waldeck (source : JACOPS *et al.*, 1990)

III.3.3. Description de la séquence et chronologie

L'étang-tourbière de Waldeck (WAL) a été sondé en décembre 2016. Le prélèvement a été réalisé au bord de la tourbière, à la limite de l'eau libre de l'étang, dans un gazon de bordure d'étang en eau peu profonde. Une séquence de 110 cm a été extraite (Figure III.3-7).

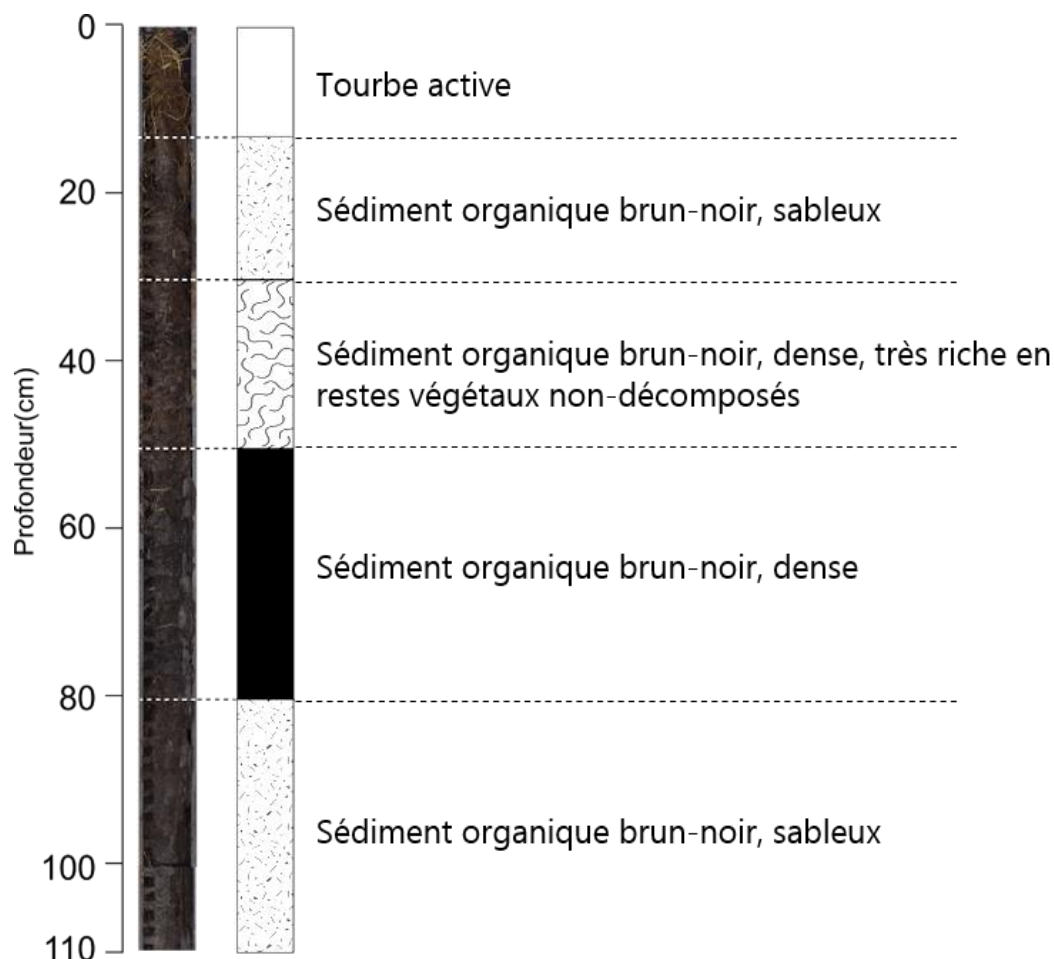


Figure III.3-7 : Photographie et description de la séquence de WAL

Huit échantillons ont été envoyés pour datations radiocarbone (Tableau III.3-1).

Le modèle d'âge couvre environ les 6000 dernières années (Figure III.3-8.A). Le bas de la séquence présente un taux d'accumulation moyen de 0.12 mm.an^{-1} (Figure III.3-8C). Un ralentissement de l'accumulation de tourbe est perçu autour de 82 cm de profondeur (0.09 mm.an^{-1}). Enfin, vers 60 cm de profondeur, le modèle d'âge montre une augmentation de l'accumulation avec un taux de 0.29 mm.an^{-1} .

Tableau III.3-1 : Datations radiocarbone de la séquence de Waldeck.

ID laboratoire	Profondeur (cm)	Type d'échantillon	Age ^{14}C BP	Age cal.BP (2σ)	Age cal. BC/AD (2σ)
Poz-96853	32	Graines de <i>Carex</i>	570±50	654 - 519	AD 1297 - 1431
Beta-507031	42	Sédiment total	940±30	925 - 791	AD 1025 - 1160
Poz-96854	56	Sédiment total	1540±30	1525 - 1363	AD 426 - 588
Beta-507032	66	Sédiment total	2530±30	2746 - 2492	BC 797 - 543
Beta-507033	72	Sédiment total	3090±30	3376 - 3226	BC 1427 - 1277
Poz-97970	81	Charbons/graines	3970±100	4710 - 4149	BC 2761 - 2200
Poz-105878	112	Charbons	5920±40	6806 - 6658	BC 4857 - 4709
Poz-105879	119	Charbons	6430±120	7573 - 7155	BC 5624 - 5206

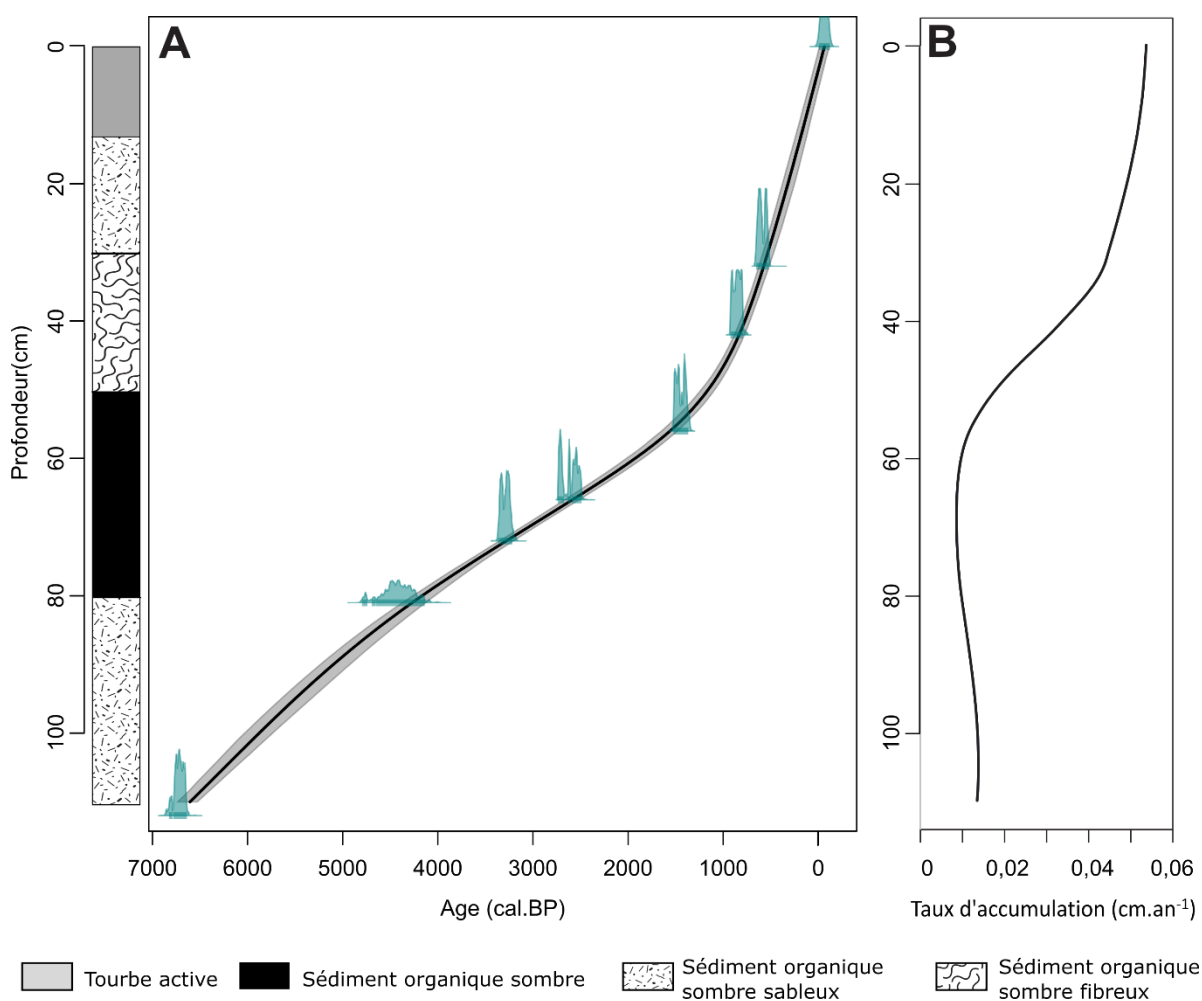


Figure III.3-8: Modèle âge-profondeur de la séquence de WAL (A), et évolution du taux d'accumulation (B)

III.3.4. Résultats

Les résultats sont présentés sur les diagrammes III.3-9 (p. 173), III.3-10 (p. 176), III.3-11 (p. 178) et III.3-12 (p. 179) et les principaux résultats sont résumés dans les tableaux III.3-2 (p. 184) et III.3-3 (p. 185).

III.3.4.1. Description des diagrammes polliniques

- LPAZ WAL1

Cette zone est dominée par *Pinus* et *Corylus*, accompagnés par *Quercus*, *Ulmus*, *Tilia*, *Fraxinus*. Les pollens des *Fagus* sont présents mais les pourcentages sont faibles (<5%), tout comme ceux d'*Abies* qui reste anecdotique. Les taxons herbacés sont dominés par les Poaceae, accompagnés de *Calluna* et quelques IPA (*Artemisia*, Anthemideae, Cichorioideae).

Alnus et *Betula* dominent la végétation locale, suivi par *Salix*, dont les pourcentages polliniques augmentent au sommet de la zone. Le cortège des taxons herbacés est dominé par les Cyperaceae et les Poaceae mais quelques pollens de *Lysimachia* et d'Apiaceae sont également identifiés. Les spores de *Sphagnum* sont présentes en assez grand nombre.

L'analyse des MNP montre que peu de spores de champignons sont comptées dans cette zone, excepté pour les types HdV 27 et HdV 18. Quelques carporestes de *Juncus* sp. sont identifiés dans le sédiment. L'analyse des particules carbonisées atteste de la présence de μ PC ainsi que de légers pics du taux d'accumulation des MPC.

La part de la fraction minérale est très importante (75%) et les teneurs en silice et titane augmentent. Les valeurs des rapports éléments métalliques/Ti diminuent le long de la zone.

- LPAZ WAL2

Les pourcentages des pollens de *Pinus* montrent une tendance à la diminution tout au long de la zone même s'il reste un des arbres dominants. À l'inverse, ceux de *Corylus* sont plus importants que pour la zone 1, alors que ceux des taxons de la chênaie restent stables, excepté ceux d'*Ulmus* et de *Tilia* qui diminuent dans la seconde moitié de la zone, alors que les pourcentages des pollens de *Fagus* augmentent. La végétation herbacée est très semblable à celle de la zone précédente, avec l'apparition d'un pollen de *Cerealia*-type à la fin de la zone.

Le diagramme de la végétation locale pour cette zone est très similaire à celui de la première zone à l'exception de *Salix* dont les pourcentages polliniques augmentent pour la première moitié de la zone. De plus, les pourcentages des pollens des Cyperaceae diminuent dans la seconde moitié de la zone, tout comme le nombre de spores de *Sphagnum* le long de la zone.

De même, l'assemblage des MNP est identique à celui de la zone 1 avec cependant l'augmentation de la concentration des spores du type HdV 18 dans la seconde moitié de la zone. Le taux d'accumulation des MPC montre trois légères augmentations. Le nombre de carporestes de *Juncus* sp. augmente tout au long de la zone.

Le pourcentage de matière minérale présente dans le sédiment diminue dans cette zone, avant de réaugmenter temporairement au sommet de la zone. Les teneurs en silice, aluminium, titane et rubidium diminuent également. En revanche, le rapport Pb/Ti montre une très légère augmentation au milieu de la zone.

- LPAZ WAL3

La première moitié de la zone est marquée par la très forte augmentation des pourcentages polliniques de *Fagus*, accompagné d'*Abies*, alors que ceux de *Pinus* diminuent de manière synchrone. Dans la seconde partie de la zone, l'évolution inverse est observée : les pourcentages des pollens de *Pinus* augmentent à nouveau alors que ceux de *Fagus* chutent. Les pourcentages des pollens de *Corylus* chutent également au début de la zone, tout comme ceux d'*Ulmus* et de *Tilia* qui disparaissent quasiment. Dans cette zone, la courbe pollinique de *Carpinus* débute et ses pourcentages augmentent jusqu'au sommet de la zone. Les pourcentages des pollens de *Quercus* enregistrent une légère augmentation à la fin de la zone. Les taxons herbacés sont dominés par les Poaceae mais la courbe pollinique du *Cerealia*-type devient continue et les pourcentages des pollens des IPA augmentent. Deux pollens de *Vitis* sont identifiés. Le nombre des spores monolètes chute fortement au début de la zone.

Lors de cette zone, les pourcentages des pollens d'*Alnus* chutent progressivement alors que ceux de *Betula* ont tendance à augmenter. Les autres taxons arboréens de la végétation locale disparaissent quasiment. Les taxons mésohygrophiles présents jusqu'alors en pourcentage très faibles, se raréfient encore au cours de la zone, comme les pourcentages des pollens des Cyperaceae qui disparaissent complètement au milieu de la zone avant de commencer à

augmenter de nouveau. Le nombre des spores de *Sphagnum* augmente de manière très importante dans la seconde moitié de la zone.

La zone 3 débute avec un pic du taux d'accumulation des MPC ainsi qu'une augmentation de la concentration des μ PC. Après avoir diminué, la concentration des μ PC réaugmente et les MPC enregistrent à nouveau un pic du taux d'accumulation à la fin de la zone. Concernant l'assemblage des MNP, les concentrations des spores du type HdV 18 qui étaient toujours en augmentation chutent, avant d'augmenter à nouveau, comme observé pour les concentrations des spores du type HdV 27. En toute fin de la zone, les types HdV 55 et HdV 112 apparaissent. Les restes de graines de *Juncus* sp. sont très rares dans cette zone.

La perte au feu montre une très forte chute du pourcentage de matière minérale dans le sédiment, qui atteint des valeurs jusqu'alors jamais atteinte (<20%). De même, les teneurs en silice, aluminium, titane et rubidium diminuent également plus ou moins progressivement à partir du début de la zone. À l'inverse, les rapports Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti, Ni/Ti et Fe/Ti augmentent dans la première moitié de la zone avant de diminuer à nouveau et de se stabiliser.

- LPAZ WAL4a

Dans la première moitié de la zone, les pourcentages des pollens d'arbres diminuent. Ceux de *Pinus*, *Corylus* et *Quercus* ont tendance à diminuer alors que les pourcentages des pollens des Poaceae, de *Cerealia*-type et de la somme des IPA augmentent. Parmi les IPA, les courbes polliniques des Anthemideae, de *Plantago lanceolata* et de *Rumex* deviennent continues et les pourcentages des pollens de *Calluna* augmentent, tout comme le nombre de spores trilètes identifiées. À l'inverse, dans la seconde moitié de la zone, les pourcentages des pollens d'arbres augmentent à nouveau, comme ceux de *Quercus* sont en hausse alors que ceux de tous les taxons herbacés diminuent. Dans cette zone, les pourcentages des pollens de *Picea*, jusqu'alors très faibles et discontinuent, augmentent.

La diminution des pourcentages des pollens d'*Alnus* continue, maintenant accompagnée par celle des pourcentages polliniques de *Betula*, alors que les pollens de *Salix*, disparus dans la zone 3, sont à nouveau identifiés. Les pollens de taxons mésohygrophiles redeviennent un peu plus fréquent et les pourcentages des pollens des Cyperaceae augmentent également, tout comme le nombre de spores de *Sphagnum*.

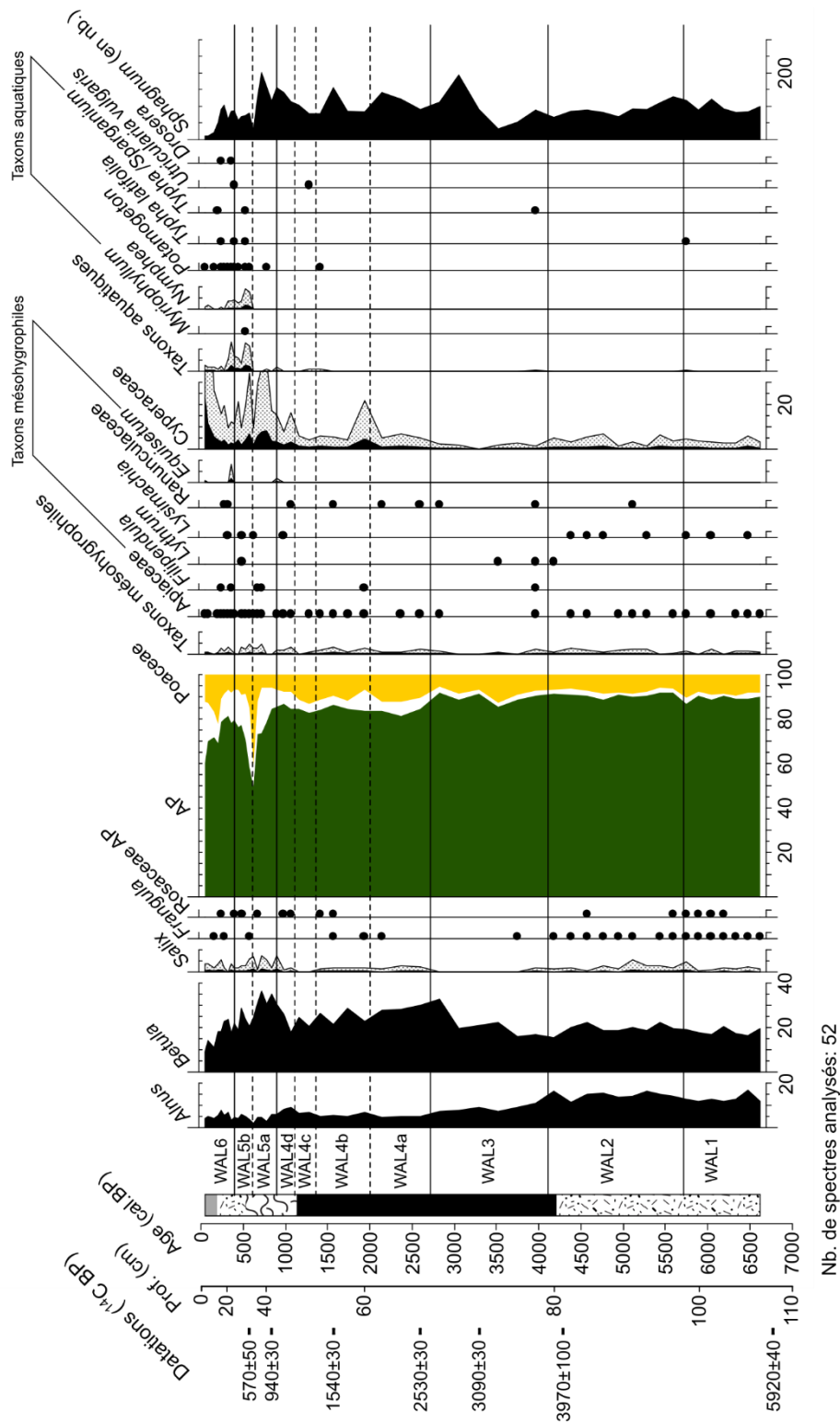


Figure III.3-10 : Diagramme pollinique simplifié de la végétation locale de la séquence de WAL. LPAZ: local pollen assemblage zone, AP: arboreal pollen, NAP : non arboreal pollen (analyses : E.Gouriveau)

Le comptage des μPC montre que la très forte augmentation des concentrations commencée à la phase précédente continue et que la valeur maximale de toute la séquence est atteinte au milieu de la zone, avant que les concentrations chutent. De même, l'augmentation des concentrations des spores des types HdV 27 et HdV 18 se poursuivent alors que les types HdV 172, HdV 113 et HdV 360 apparaissent. Des carporestes de *Juncus* sp. sont à nouveau identifiés dans le sédiment.

À partir du milieu de la zone, les valeurs de tous les rapports « éléments métalliques/Ti » augmentent brièvement avant de diminuer à nouveau au sommet de la zone.

- LPAZ WAL4b

Après une rapide augmentation, les pourcentages des pollens de *Pinus* diminuent dans cette zone, comme ceux de *Picea*, alors qu'à l'inverse, ceux de *Quercus* augmentent dans la seconde partie de la zone. Les pollens de Poaceae dominant toujours les taxons herbacés et un pic des pourcentages polliniques de *Cerealia*-type est visible dans la seconde moitié de la zone, alors que les pourcentages de l'ensemble des IPA déclinent jusqu'au sommet de la zone où ils augmentent à nouveau. Les pourcentages des pollens de *Calluna* suivent le même schéma que les IPA alors que ceux des Ericaceae sont en hausse.

La végétation locale est assez similaire à celle de la zone précédente à l'exception des pourcentages des pollens des Cyperaceae qui diminuent à nouveau.

Le début de la zone est marqué par la présence d'un pic du taux d'accumulation des MPC alors que les concentrations des μPC augmentent légèrement avant de se stabiliser. Les concentrations des spores du type HdV 27 atteignent une valeur maximale au début de la zone avant de chuter jusqu'au milieu de la zone. Les premières spores du type HdV 13 sont identifiées dans ce niveau, tout comme celles du type HdV 61. Le nombre de restes de *Juncus* sp. diminue progressivement le long de la zone.

Les valeurs des rapports Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti et Ni/Ti augmentent à nouveau brièvement dans la première partie de la zone. Le pourcentage de matière minérale dans le sédiment diminue au sommet de la zone.

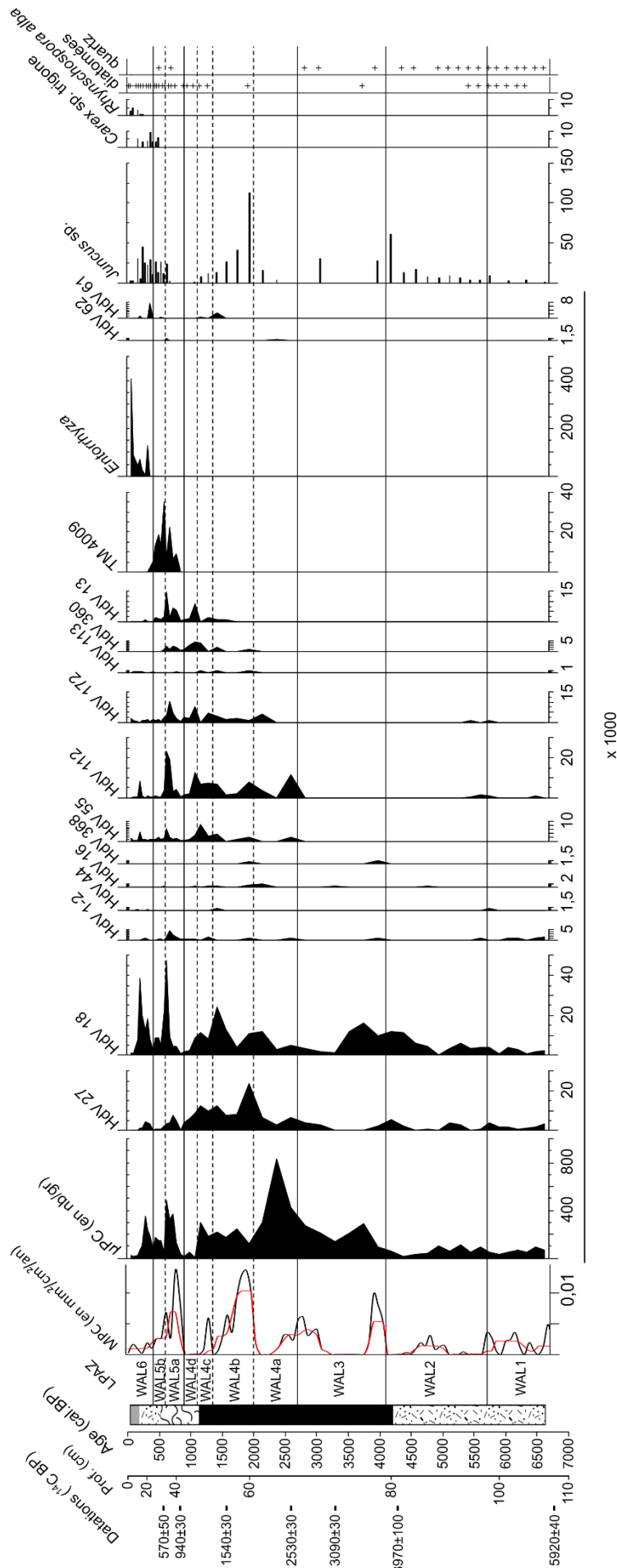


Figure III.3-11: Résultats simplifiés de la perte au feu, de l'analyse XRF et des comptages des spores de champignons coprophiles et des particules carbonisées pour la séquence de WAL (analyses : E.Gouriveau, analyses MPC : V.Robin, analyses carpologiques : C.Schaal)

- LPAZ WAL4c

Dans la zone 4c, les pourcentages des pollens de *Pinus* et de *Quercus* diminuent brièvement alors que ceux de *Corylus*, de *Fagus*, d'*Abies* et de *Carpinus* augmentent. Un pic des pourcentages des pollens de *Cerealia*-type, de ceux de *Calluna* et des Poaceae sont visibles, alors que les pourcentages de l'ensemble des IPA sont très faibles.

Dans cette zone, les pourcentages des pollens d'*Alnus* connaissent un léger retour alors que les pollens de *Salix* disparaissent. Les pourcentages des pollens des Cyperaceae augmentent à nouveau et le nombre de spores de *Sphagnum* commence également à augmenter.

Le début de la zone est marqué par un important pic du taux d'accumulation des MPC et les concentrations des μ PC augmentent légèrement le long de la zone. Les concentrations des spores des types HdV 27 et HdV 18 diminuent alors que celles des types HdV 55, HdV 112, HdV 360 et HdV 13 augmentent. Le nombre de restes de *Juncus* sp. identifiés diminue toujours.

La quantité de matière minérale dans le sédiment diminue toujours, tout comme les valeurs des teneurs en silice, aluminium et titane. Les valeurs des rapports Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti, Ni/Ti et Fe/Ti augmentent au cours de cette zone et le rapport Fe/Ti atteint sa valeur maximale.

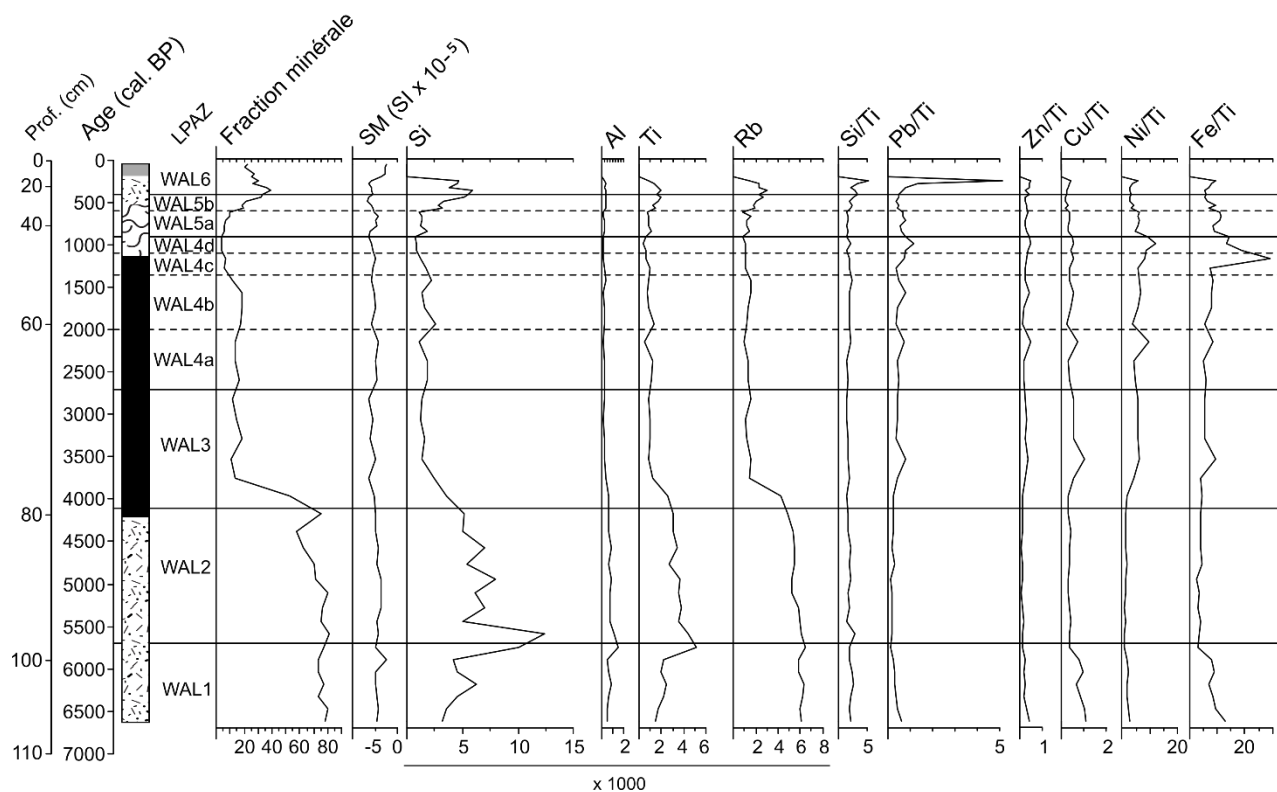


Figure III.3-12 : Résultats de la perte au feu, des mesures de susceptibilité magnétique et résultats simplifiés de l'analyse XRF de la séquence de WAL

- LPAZ WAL4d

Dans cette très courte zone, les pourcentages des pollens d'arbres diminuent, principalement représentés par ceux de *Pinus* et *Corylus*, alors que ceux de *Quercus* et *Fagus* augmentent. Aucun pollen de céréales n'est identifié alors que les pourcentages des IPA augmentent à nouveau avec le retour de leur courbe pollinique continue (*Plantago lanceolata* et *Rumex*). Les pourcentages des pollens du taxon *Cannabis/Humulus* augmentent, tout comme ceux des Ericaceae et le nombre des spores trilètes.

Les pourcentages des pollens d'*Alnus* déclinent à nouveau dans cette zone, alors que ceux de *Betula* connaissent une nette augmentation, tout comme ceux de *Salix*. La hausse des pourcentages des pollens des Cyperaceae et du nombre des spores de *Sphagnum* continuent.

Au cours de cette zone, les concentrations des μPC diminuent jusqu'à de très faibles valeurs tout comme les concentrations de tous les types de MNP présents dans la zone précédente.

Les valeurs des rapports Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti et Ni/Ti augmentent avant de diminuer au sommet de la zone.

- LPAZ WAL5a

Les pourcentages des pollens de *Pinus* chutent dans cette zone jusqu'à de très faibles valeurs (1,4%), accompagnés par ceux de *Fagus* alors que les valeurs de *Quercus* restent très élevées, avant de chuter elles-aussi au sommet de la zone. De manière globale, les pourcentages des pollens d'arbres chutent très fortement jusqu'à un minimum de 31% et ceux de tous les taxons herbacés augmentent fortement : Poaceae, céréales et essentiellement *Secale*-type qui apparaît au début de la zone, les IPA et *Calluna*.

Les pourcentages des pollens d'*Alnus* régressent toujours, accompagnés à partir du sommet de la zone de ceux de *Betula*. Les pourcentages des pollens des Cyperaceae atteignent leur valeur maximale au milieu de la zone avant de diminuer, tout comme les spores de *Sphagnum*.

Dans cette zone, le taux d'accumulation des MPC enregistre un très important pic et les concentrations des μPC augmentent à nouveau tout au long de la zone. Les concentrations de tous les types de MNP présents lors de la zone précédente augmentent et le type TM 4009, identifié pour la première fois de la séquence atteint très vite des concentrations extrêmement élevées. Au sommet de la zone, les carporestes de *Juncus* sp. sont à nouveau identifiés.

Le pourcentage de fraction minérale dans le sédiment augmente tout au long de la zone alors que les valeurs de tous les rapports « éléments métalliques/Ti » diminuent dans la première partie de la zone. Dans la seconde partie, les valeurs du rapport Pb/Ti augmentent brièvement.

- LPAZ WAL5b

À l'inverse de la zone précédente, les pourcentages des pollens arboréens augmentent très rapidement et retrouvent presque leur valeur du début de la zone 5a. En effet, les pourcentages des pollens de *Pinus* et de *Fagus* augmentent alors que ceux de *Quercus* augmentent jusqu'au sommet de la zone, puis commencent à chuter à leur tour. Les premiers pollens de *Castanea* et *Juglans* sont identifiés à partir du début de la zone. Tous les taxons herbacés déclinent (Poaceae, *Secale*-type, IPA, *Calluna*), à l'exception de *Cerealia*-type dont les pourcentages augmentent légèrement.

La végétation locale de cette zone est caractérisée par des pollens de taxons mésohygrophiles plus fréquents, mais surtout par la très forte augmentation des pourcentages des pollens de taxons aquatiques, essentiellement *Nymphaea*. Les pourcentages des pollens des Cyperaceae diminuent et le nombre des spores de *Sphagnum* est de moitié plus bas qu'à la zone précédente.

La transition avec la zone précédente est marquée par un pic du taux d'accumulation des MPC, alors que les concentrations des μ PC chutent avant d'augmenter à nouveau et de se stabiliser. Les concentrations de tous les types de MNP identifiés dans la zone précédente diminuent alors que le nombre de restes carpologiques de *Juncus* sp. augmente et que des restes de *Carex* sp. trigone sont identifiés.

Le pourcentage de la fraction minérale dans le sédiment augmente toujours, tout comme les valeurs des teneurs en silice, titane et rubidium. La valeur du rapport Pb/Ti commence à augmenter au sommet de la zone.

- LPAZ WAL6

Dans cette dernière zone, les pourcentages des pollens arboréens subissent une nouvelle régression, bien plus faible que la chute de la zone 5a. *Quercus* et *Fagus* sont les principaux taxons dont les pourcentages polliniques déclinent alors que ceux de *Pinus* continuent

d'augmenter. Au sommet de la séquence, les pourcentages des pollens de *Picea* accompagnent également l'augmentation de ceux de *Pinus*, engendrant à nouveau une hausse des pourcentages des pollens d'arbres. À l'inverse, les pollens des Poaceae dont les pourcentages augmentaient en première partie de la zone, diminuent à nouveau. Les pollens de céréales et de *Calluna* se raréfient tout au long de la zone alors que les pourcentages des IPA restent stables, essentiellement représentés par les pollens de *Plantago lanceolata*, *Rumex* et des Urticaceae au sommet de la séquence. Le nombre des spores trilètes diminue également.

Tout au long de la zone, les pourcentages des pollens de *Betula* diminuent progressivement. Les taxons aquatiques, bien présents à la zone précédente, diminuent jusqu'à de très faibles pourcentages pour le reste de la séquence alors que des pollens d'*Utricularia vulgaris* et de *Drosera* sont identifiés au début de la zone et que le nombre de spores de *Sphagnum* augmente. Le sommet de la séquence est ensuite caractérisé par l'importante hausse des pourcentages des pollens des Cyperaceae et par une diminution du nombre des spores de *Sphagnum*.

Deux très faibles pics du taux d'accumulation des MPC sont enregistrés dans cette zone alors que les concentrations de μ PC sont en constante diminution, après avoir légèrement augmentées au début de la zone. Un pic des concentrations de plusieurs types de MNP sont enregistrés dans cette zone (HdV 27, HdV 18, HdV 55, HdV 112, HdV 61). Les spores du microfossile *Entorrhiza* apparaissent et leur concentration augmente fortement jusqu'au sommet de la séquence. Le nombre des carporestes de *Juncus* sp. diminue jusqu'à la surface, tout comme celui des carporestes de *Carex* sp. trigone. À l'inverse, des restes de *Rhynchospora alba* sont identifiés dans la seconde partie de la zone.

Le pourcentage de matière minérale dans le sédiment diminue jusqu'à la surface, tout comme les teneurs en silice, titane et rubidium, bien que l'enregistrement XRF n'ait pas été possible sur les 44 premiers centimètres de la carotte. Cette zone est essentiellement marquée par une très forte augmentation de la valeur du rapport Pb/Ti.

III.3.4.2. Commentaires

La comparaison des concentrations polliniques et des pourcentages polliniques montre une parfaite adéquation entre les deux représentations qui suivent les mêmes tendances (Figure III.3-13). Les pourcentages peuvent donc être utilisés sans craindre de biais de conservation.

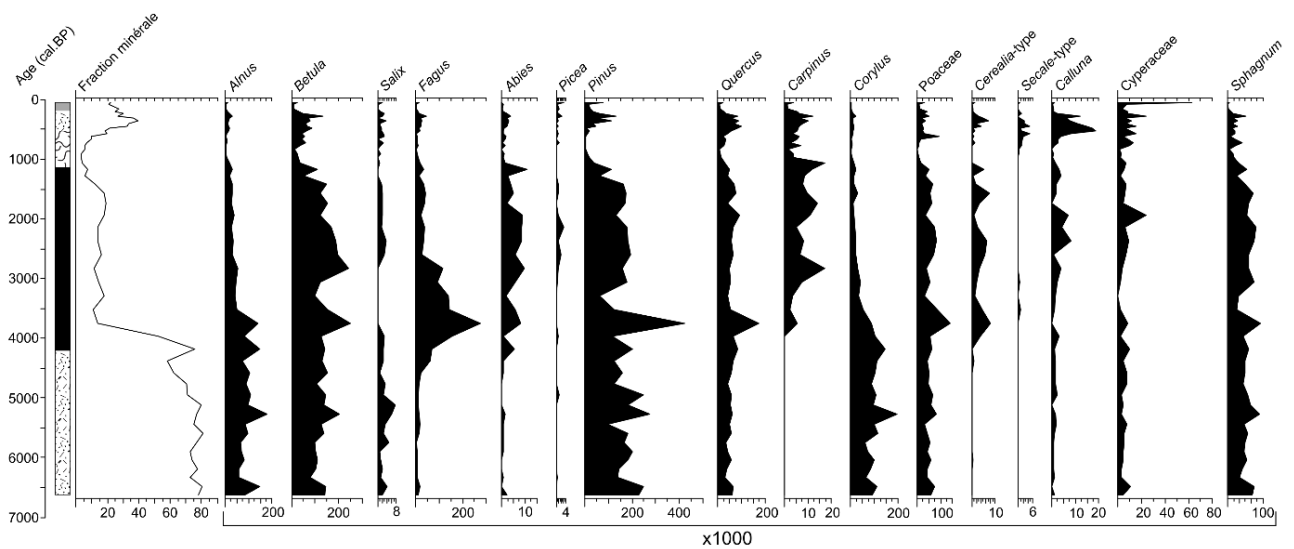


Figure III.3-13: Quelques taxons polliniques représentés en concentration (nb/g de sédiment)

Tableau III.3-2: Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de WAL, concernant les enregistrements extra-locaux à régionaux (pollens, XRF, μ PC) ainsi que la perte au feu (PAF) et la susceptibilité magnétique (SM). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, IPA : indices polliniques d'anthropisation, \uparrow : augmentation, \downarrow : diminution, max. : valeur maximale

Borne en cal.BP (prof.)	Essence dominante	Végétation forestière	NAP, céréale et IPA	PAF, XRF et μ PC
44 (6cm)	Pinus- (<i>Quercus-Fagus</i>)	-360 cal.BP: \downarrow AP \uparrow Pinus \downarrow Quercus et Fagus -275 cal.BP: \uparrow Picea	-80 cal.BP: pic d'IPA (5,5%) -200 cal.BP: pic de Poaceae (31%) puis \downarrow -360 cal.BP: pic de céréales (3%) puis \downarrow \downarrow céréales et Calluna \downarrow spores trileètes	-360 cal.BP: pic de la fraction minérale puis \downarrow -Si, Ti, Rb \downarrow \uparrow Pb/Ti -275 cal.BP: pic de μ PC puis \downarrow
400 (24cm)		- \uparrow AP (Pinus, Fagus) -480 cal.BP: max. Quercus (44%) puis \downarrow -apparition de Castanea et Juglans	-440 cal.BP: pic de céréales (3,5%) -530 cal.BP: pic de Calluna (10,5%) puis \downarrow -570 cal.BP: pic de Secale-type (3,5%) et IPA (12%) puis \downarrow \downarrow Ericaceae	- \uparrow fraction minérale \uparrow Si, Ti, Rb \uparrow Pb/Ti \downarrow μ PC
600 (33cm)	Quercus (Fagus)	-620 cal.BP: mini. AP: Pinus (1,4%), Fagus -670 cal.BP: max. Quercus puis \downarrow -770 cal.BP: \downarrow AP	-620 cal.BP: max. de Poaceae (58%) -720 cal.BP: pic de céréales (3%), IPA (11%) et Calluna (3,4%) -770 cal.BP: \uparrow Poaceae -900 cal.BP: courbe continue de Secale-type, \uparrow céréales -975 cal.BP: pic d'IPA (3%) et de <i>Cannabis/Humulus</i> (0,8%) -950-1160 cal.BP: disparition des céréales -1060 cal.BP: \uparrow Ericaceae \uparrow spores trileètes	- \uparrow fraction minérale \uparrow Si, Ti -620 cal.BP: pic de μ PC
900 (44cm)		- \downarrow Pinus et Corylus \uparrow Quercus et Fagus	-1160 cal.BP: pic de céréales (2%) -1280 cal.BP: pic de Poaceae (18%) et de Calluna (2%)	-fraction minérale très basse \downarrow μ PC -Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti, Ni/Ti \uparrow
1100 (49cm)	Pinus- (<i>Quercus-Fagus</i>)	- \downarrow Pinus, Quercus \uparrow Carpinus, Fagus, Corylus, Abies -1 ^{er} pollen de Castanea	-1565 cal.BP: pic de céréales (2%) -1740 cal.BP: pic de Poaceae (18%) -1935 cal.BP: pic des IPA (4%) et Calluna (2%) puis \downarrow	- \downarrow fraction minérale \downarrow Si, Ti, Al \uparrow μ PC \uparrow Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti, Ni/Ti, Fe/Ti
1350 (53cm)		-1565 cal.BP: \downarrow Pinus -1935 cal.BP: pic de Quercus (27%) \downarrow Picea	-2365 cal.BP: pic de Poaceae (19%), IPA (3,4%), céréales (1,5%) et Calluna (2%)	- \downarrow fraction minérale \uparrow Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti, Ni/Ti \uparrow μ PC puis stable
2000 (61cm)	Pinus-Fagus	-2365 cal.BP: 1er mini. AP -2590 cal.BP: \uparrow Quercus \uparrow Picea	-3060 cal.BP: pic d'IPA (1,4%) -3520 cal.BP: pic de Poaceae (18%) et de céréales (1,2%), -3520 cal.BP: \uparrow IPA (<i>Artemisia</i> , <i>Anthemidae</i> , <i>Cichorioideae</i> , <i>Chenopodiaceae</i>) et Calluna -4100 cal.BP: \uparrow céréales et IPA -2 pollens de <i>Vitis</i> identifiés \downarrow spores monolètes	- \uparrow Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti, Ni/Ti, Fe/Ti -2365 cal.BP: max. μ PC, puis \downarrow
2700 (67cm)		-3290 cal.BP: max. Fagus, puis \downarrow -3745 cal.BP: \downarrow Corylus -3745 cal.BP: courbe continue de <i>Carpinus</i> \uparrow Abies, Quercus	-4575 cal.BP: \uparrow Fagus et Abies \downarrow Ulmus et Tilia -5440 cal.BP: 1er pic de Fagus (6%) -présence de <i>Picea</i> et Abies	- \downarrow fraction minérale, Si, Ti, Al, Rb -3900 cal.BP: \uparrow Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti, Ni/Ti, Fe/Ti \uparrow μ PC
4100 (79cm)	Pinus Corylus (chêne diversifié)	-4575 cal.BP: \uparrow Fagus et Abies \downarrow Ulmus et Tilia -5440 cal.BP: 1er pic de Fagus (6%) -présence de <i>Picea</i> et Abies	-présence d'IPA (<i>Artemisia</i> , <i>Anthemidae</i> , <i>Cichorioideae</i>) -5280 cal.BP: pic d'IPA (2%) -Poaceae <20% -présence d'IPA (<i>Artemisia</i> , <i>Anthemidae</i> , <i>Cichorioideae</i>)	- \downarrow Si, Ti, Al, Rb, fraction minérale \uparrow Pb/Ti -4180 cal.BP: pic de la fraction minérale -4380 cal.BP: \uparrow μ PC \downarrow μ PC rares
5700 (97cm)		WAL1		

Tableau III.3-3 : Résumé des principaux résultats obtenus pour la séquence de WAL, concernant les enregistrements locaux (pollens, MNP, MPC, graines). AP : arboreal pollens, NAP : non arboreal pollens, ↑ : augmentation, ↓ : diminution, max. : valeur maximale, mini. : valeur minimale

Borne en cal.BP (prof.) LPAZ	Essence dominante	AP	NAP	SCC et PC	MPC
44 (6cm) WAL6	<i>Betula</i> - Cyperaceae	-↓ <i>Betula</i>	-↑Cyperaceae -275 cal.BP: pic de <i>Sphagnum</i> puis ↓ -rares pollen de <i>Drosera</i> et <i>Utricularia</i> -360 cal.BP: ↓aquatiques	-pic de HdV27, HdV18, HdV55, HdV112, HdV61 -apparition d' <i>Entorrhiza</i> -↓ <i>Juncus</i> sp. et <i>Carex</i> sp. trigone -↑ <i>Rhynchospora alba</i>	- 100 et 320 cal.BP: légers pics des MPC
400 (24cm) WAL5b	<i>Betula</i> - Aquatiques	-↓ <i>Betula</i> -↓ <i>Salix</i>	-570 cal.BP: pic de Cyperaceae puis ↓ -↓ <i>Sphagnum</i> -620 cal.BP: ↑aquatiques (<i>Nymphaea</i> , <i>Potamogeton</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Typha/Sparganium</i>) -↑mésohydrophiles	-↓ MNP -↑ <i>Juncus</i> sp. et <i>Carex</i> sp. trigone	-620 cal.BP: pic des MPC
600 (33cm) WAL5a	<i>Betula</i>	-835 cal.BP: pic de <i>Betula</i> puis ↓ -↓ <i>Alnus</i>	-718 cal.BP: max. de <i>Sphagnum</i> puis ↓ -770 cal.BP: pic de Cyperaceae puis ↓	-↑MNP -apparition du TM4009 -↑ <i>Juncus</i> sp. -620 cal.BP: pic de HdV55, HdV112, HdV18	-765 cal.BP: pic des MPC
900 (44cm) WAL4d		-↑ <i>Betula</i> -↓ <i>Alnus</i>	-↑ <i>Sphagnum</i> et Cyperaceae	-↓MNP	
1100 (49cm) WAL4c		-975 cal.BP: ↑ <i>Salix</i> -↓ <i>Betula</i> , <i>Salix</i> -↑ <i>Alnus</i>	-↑ <i>Sphagnum</i> et Cyperaceae	-↓HdV18, HdV27 -↑HdV55, HdV112, HdV360, HdV13 -↑ <i>Juncus</i> sp.	-1210 cal.BP: pic des MPC
1350 (53cm) WAL4b	<i>Betula</i>	-↓ <i>Betula</i>	-1935 cal.BP: pic de Cyperaceae puis ↓	-↓HdV27 -apparition HdV13 et HdV61 -↓ <i>Juncus</i> sp.	-1875 cal.BP: pic des MPC
2000 (61cm) WAL4a		-↓ <i>Betula</i> , <i>Alnus</i> -2590 cal.BP: ↑ <i>Salix</i>	-↑ <i>Sphagnum</i> et Cyperaceae	-↑HdV18, HdV27 -apparition HdV172, HdV113, HdV360 -↑ <i>Juncus</i> sp.	
2700 (67cm) WAL3	<i>Betula</i> (<i>Alnus</i>)	-↓ <i>Alnus</i> , ↑ <i>Betula</i> -2825 cal.BP: pic de <i>Betula</i> -3965 cal.BP: ↓ <i>Salix</i> et <i>Frangula</i> -4180 cal.BP: ↓ <i>Alnus</i>	-3290 cal.BP: mini. Cyperaceae puis ↓ -3520 cal.BP: ↑ <i>Sphagnum</i>	-↑HdV18 puis ↓ -apparition HdV55, HdV112 -↑HdV27 -↓ <i>Juncus</i> sp.	-2760 cal.BP: pic des MPC -3870 cal.BP: pic des MPC
4100 (79cm) WAL2	<i>Betula</i> - <i>Alnus</i>	- ↑ <i>Salix</i> puis ↓	-4760 cal.BP: ↓Cyperaceae -↓ <i>Sphagnum</i>	-idem zone 1 -↑HdV18 -↑ <i>Juncus</i> sp.	-pics de MPC autour de 4760 cal.BP
5700 (97cm) WAL1		-↑ <i>Salix</i>	-rares pollens de <i>Lysimachia</i> et d'Apiaceae	-MNP rares, sauf HdV27 et HdV18 -quelques restes de <i>Juncus</i> sp.	-plusieurs pics de MPC

III.4. La bétulaie tourbeuse du Bitscherthal

III.4.1. Localisation et végétation actuelle

La bétulaie tourbeuse de Bitscherthal (Figure III.4-1) se situe à moins de 2 km au nord-ouest de la commune de Mouterhouse dans le département de la Moselle (48°59.734'N, 7°26.599'E) et 6 km au sud de Bitche, à une altitude de 237 m (Figure III.1, Figure III.4-2, A). La surface de la bétulaie est estimée à environ 0,89 ha. L'étang-tourbière est classé depuis 1988 et fait de nos jours partie de la Réserve Naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche (Figure I.1-8).



Figure III.4-1 : Photo du site de prélèvement dans la bétulaie tourbeuse de Bitscherthal (cliché : E.Gouriveau)

La bétulaie s'étend le long du cours d'eau du Bitscherthal, alimentée par des suintements de pente (Figure III.4-2, B.a). Elle se trouve au fond d'une très étroite vallée, large de moins de 100 m (Figure III.4-2, B.b), dont les versants sont constitués de Grès vosgien inférieur (t1b) alors que le Grès vosgien supérieur (t1c) affleure sur les plateaux en surplomb (Figure I.1-5) (BLANALT *et al.*, 1967).

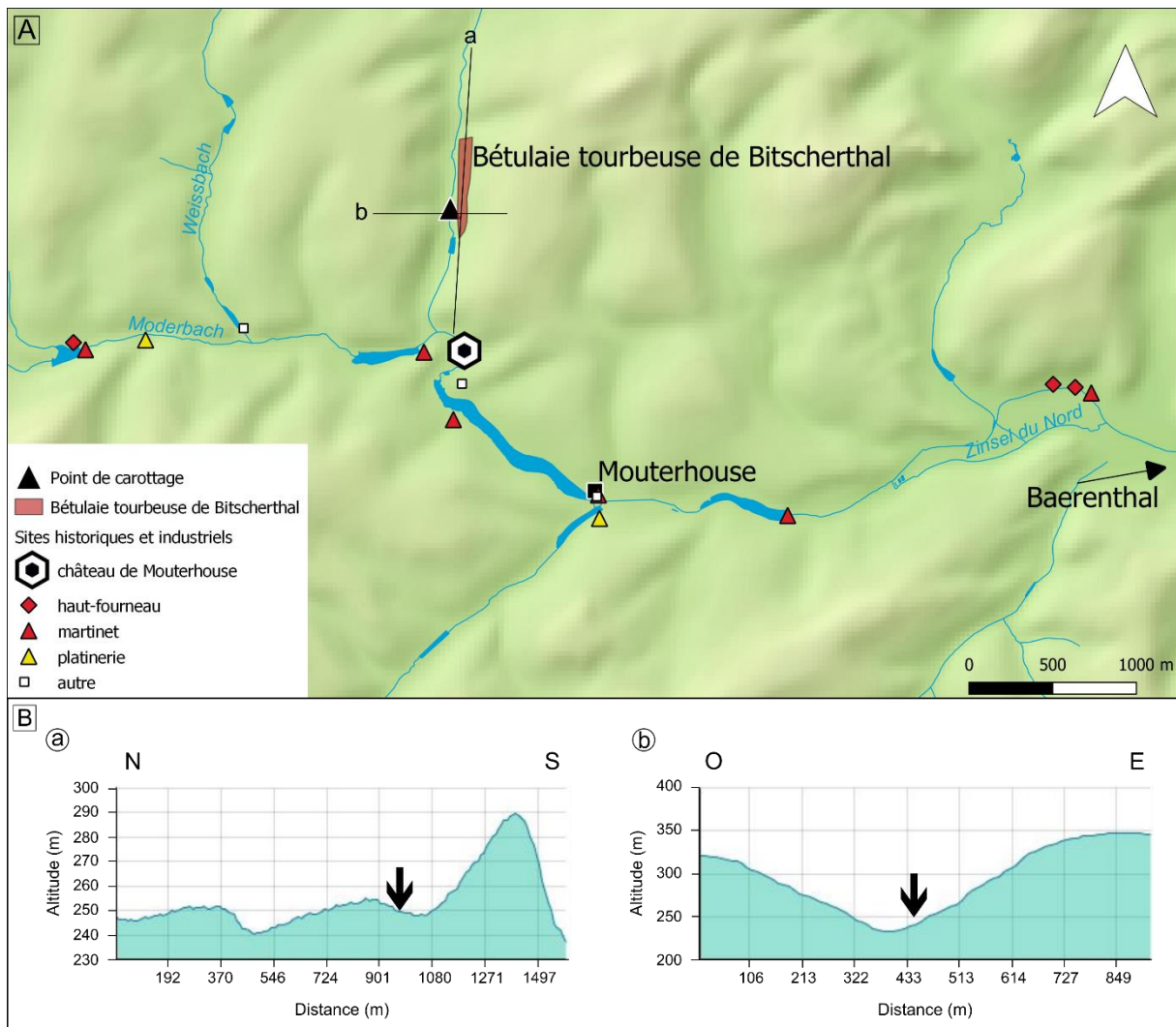


Figure III.4-2 : Localisation de la bétulaie tourbeuse de Bitscherthal et des principaux sites historiques et industriels des environs (A, a et b : localisation des profils altimétriques)(auteur : E.Gouriveau, source : BDALTI2 ©IGN, KRAFT, 2013) et profils altimétriques nord-sud (B.a) et ouest-est (B.b). La flèche localise l'emplacement du point de prélèvement. (source : Géoportail ©IGN)

La végétation actuelle de la zone humide est caractérisée par un bois de bouleau à sphaignes mésoacidiphile (type d'habitat EUNIS G1.513) (Figure III.4-3). Sur les pentes se trouvent des forêts mixtes de hêtraie-chênaies acidiphiles (*Leucobryo-Fagetum*) à pins sylvestres et autres résineux. Des peuplements de grandes laïches (type d'habitat EUNIS D5.21) sont localisés à la limite de la zone humide, au bord de la route communale qui la limite vers l'ouest.

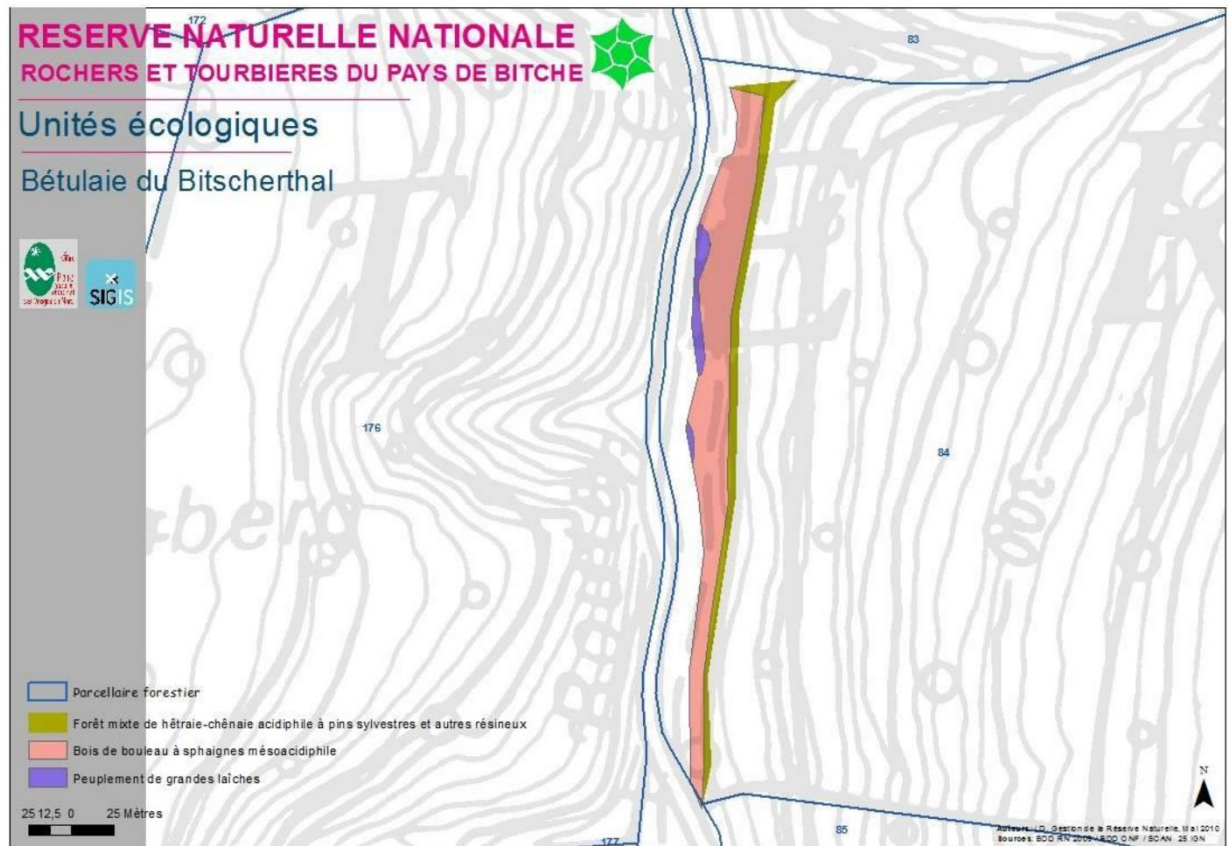


Figure III.4-3 : Carte de végétation du site de la bétulaie tourbeuse de Bitscherthal

III.4.2. Contexte historique du site de Bitscherthal

Sur la commune de Mouterhouse, les vestiges du rempart de contour de l'enceinte de Gruenberg fait remonter l'occupation humaine locale au moins aux Âges des Métaux, probablement liée à l'exploitation du minerai de fer depuis l'Âge du Fer dans les sols des forêts de la région (SCHMIT, 2008 ; SCHMIT *et al.*, 2017).

Le village de Mouterhouse est mentionné depuis 1518, puis, au XVI^{ème} siècle, un château, le *Wasserburg*, et une chapelle castrale (Figure III.4-4), haut-lieu religieux du Pays de Bitche, sont construits. Au XVII^{ème} siècle, la cense de Mouterhouse est l'une des plus importantes du Comté de Bitche (JACOBS *et al.*, 1990 ; MENGUS, 2009).

Le site de Bitscherthal constitue un site de choix pour étudier le développement et les impacts des activités minières et métallurgiques. En effet, dès 1614, une forge et une fonderie sont construites au bord du Moderbach par Jean-Valentin de Dithmar (Figure III.4-2, A) puis en 1631, une batterie de cuivre et une fonderie voient le jour (KRAFT, 2012). Les activités

métallurgiques sont stoppées au cours des conflits de la Guerre de Trente Ans mais reprennent avec le démarrage d'un nouveau haut-fourneau en 1723 sous l'impulsion de Jean-Frédéric de Dithmar et de Jean-Georges Mader (KRAFT, 2012). Ce haut-fourneau exploite le minerai local et les grandes forêts de la cense de Mouterhouse, selon un règlement bien établi. À la fin du XVIIIème siècle, l'usine de Mouterhouse devient la plus importante d'Alsace-Lorraine (Figure III.4-5, KRAFT, 2012).



Figure III.4-4 : Chapelle de Mouterhouse (cliché : E.Gouriveau)

En 1843, les installations de Mouterhouse sont achetées par l'entreprise de Dietrich qui construit de nombreuses autres installations au cours des XVIIIème et XIXème siècles (Figure III.4-2, A). Ce développement fait de l'usine de Mouterhouse un ensemble industriel « intégré » depuis le minerai local jusqu'aux produits finis, dont l'activité se poursuivra jusqu'en 1945 (KRAFT, 2012).

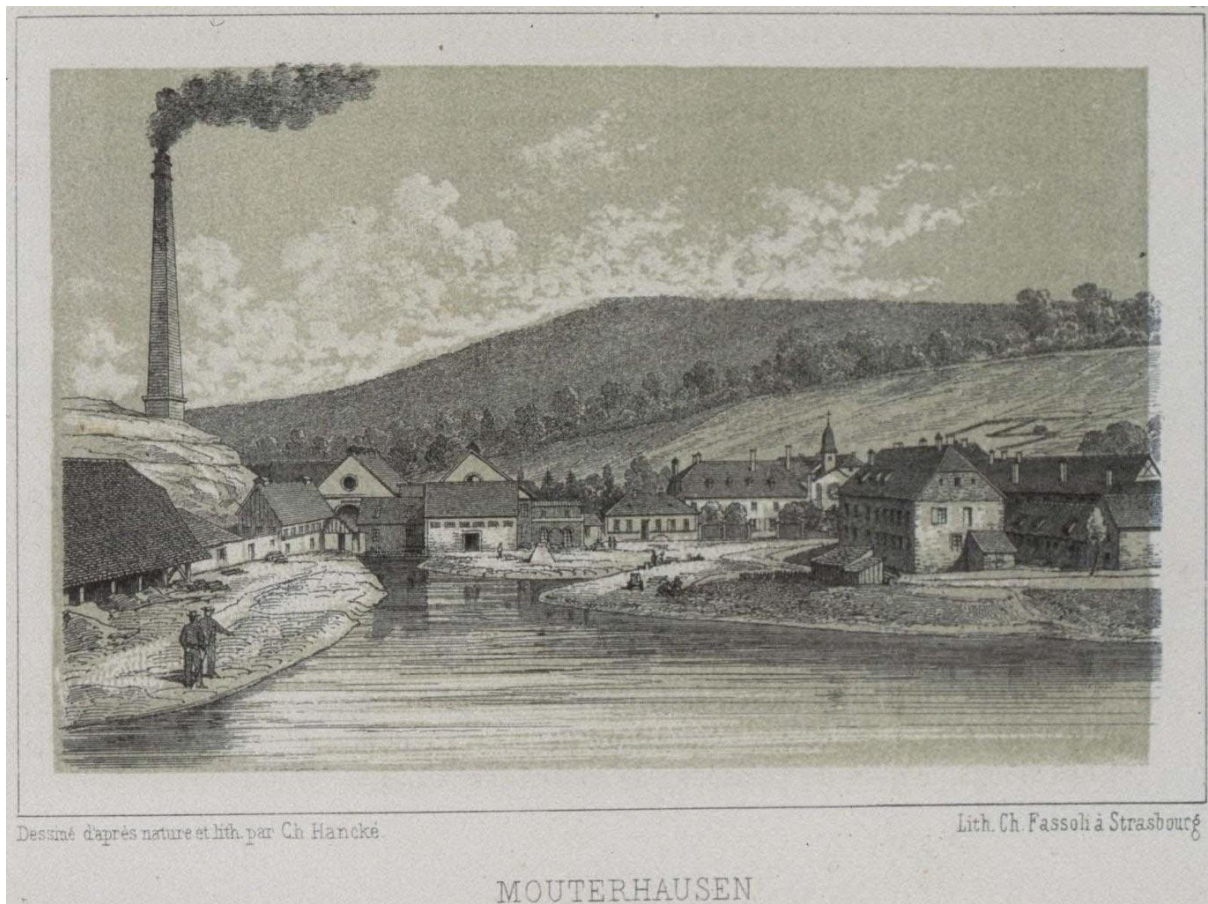


Figure III.4-5 : Forge de Mouterhouse, dessin et lithographie de C. Hancké, 1869 (source : gallica.bnf.fr, BNU Strasbourg)

III.4.3. Description de la séquence et chronologie

La bétulaie tourbeuse de Bitscherthal (BIT) a été sondée en décembre 2016. Le prélèvement a été réalisé dans le peuplement de grandes laïches. Une séquence de 170 cm a été extraite (Figure III.4-6).

Dix échantillons ont été envoyés pour datations radiocarbone (Tableau III.4-1). La plupart des datations a été réalisée sur sédiment total du fait de la quasi-absence de matériel végétal datable dans le sédiment et de l'importante fraction détritique.

Malheureusement, les résultats obtenus ne sont pas du tout cohérents et indiquent une stratigraphie totalement remaniée. Cela peut facilement s'expliquer, d'une part, par la présence de suintements de pente qui ont pu transporter des sédiments le long de la pente, d'autre part, par la proximité immédiate des versants de Grès vosgiens (Figure III.4-2, B.b), dont l'érosion a

engendré des apports détritiques très importants dans la zone humide, clairement identifiés par les passées sableuses rosâtres visibles dans la carotte (Figure III.4-6).

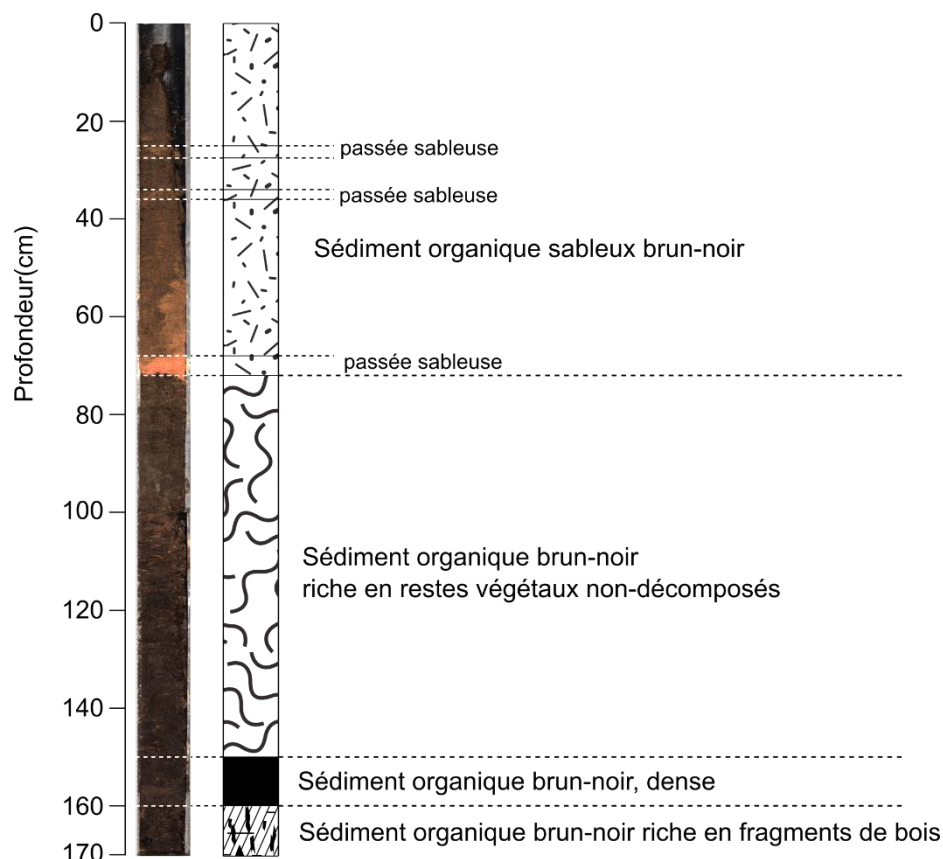


Figure III.4-6 : Photographie et description de la séquence de Bitscherthal

La fiabilité des dates obtenues est également à considérer avec précaution du fait des très faibles quantités de carbone contenues dans les échantillons envoyés pour datations, bien en-dessous du milligramme de carbone recommandé pour une mesure AMS par le laboratoire de Poznan (Tableau III.4-1).

Au vu des incertitudes autour des dates obtenues, il est impossible de construire de modèle âge-profondeur pour cette séquence.

Tableau III.4-1 : Datations radiocarbone effectuées pour la séquence de Bitscherthal.

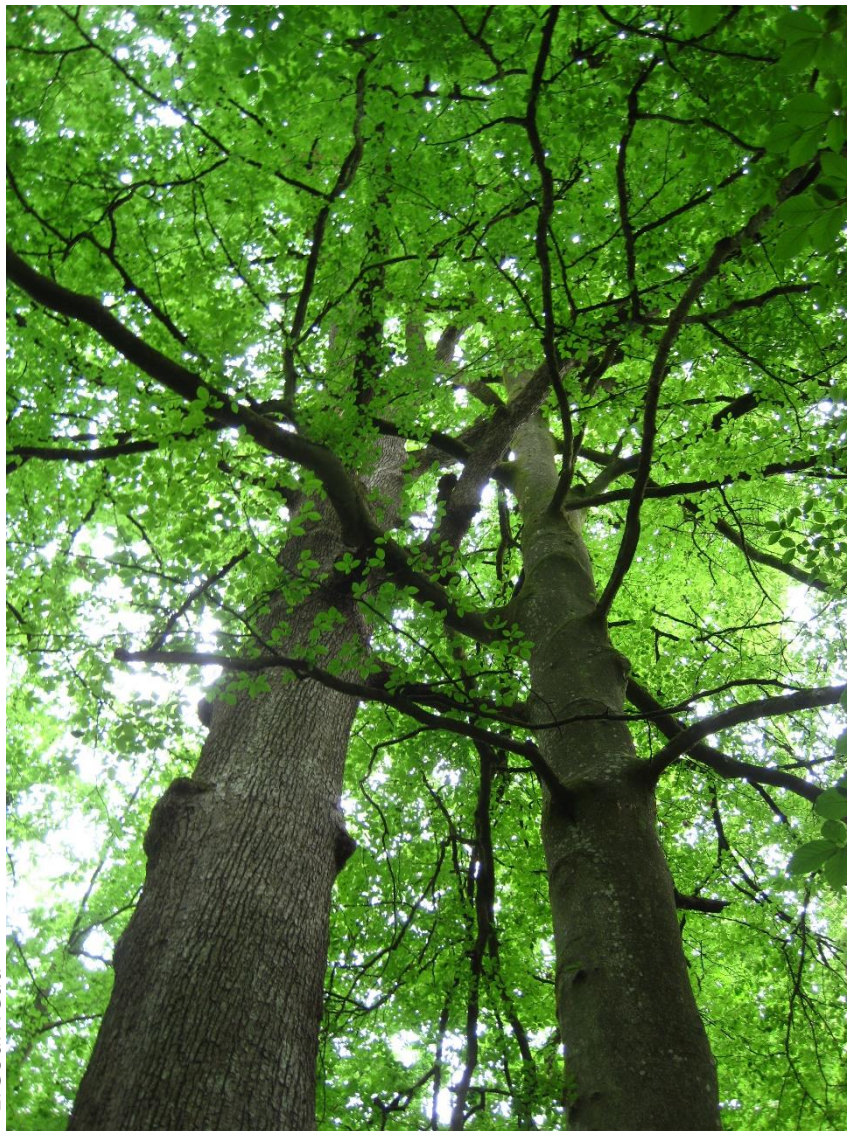
ID laboratoire	Profondeur (cm)	Type d'échantillon	Age ¹⁴ C BP	Age cal.BP (2σ)	Age cal. BC/AD (2σ)	Commentaires
Poz-109244	11	Sédiment total	2350 ± 90	2715 - 2155	BC 766 - 206	0.05 mgC
Poz-115719	25	Sédiment total	415 ± 30	521 - 433	AD 1429 - 1518	TOC, 0.5 mgC
Poz-109245	45	Sédiment total	255 ± 30	430 - 150	AD 1521 - 1800	0.13 mgC
Poz-115711	52	Sédiment total	425 ± 30	525 - 438	AD 1425 - 1617	TOC, 0.6 mgC
Poz-115710	67	Sédiment total	575 ± 30	648 - 530	AD 1302 - 1420	TOC, 0.6 mgC
Poz-115712	71	Sédiment total	380 ± 30	505 - 319	AD 1445 - 1632	TOC, 0.5 mgC
Poz-109246	78	Sédiment total	15 ± 210	468 - ...	AD 1482 - ...	peat, 0.02 mgC
Poz-109248	103	Sédiment total	290 ± 30	458 - 288	AD 1492 - 1663	
Poz-109247	135	Sédiment total	900 ± 30	911 - 741	AD 1039 - 1210	
Poz-103813	168	Restes végétaux	1625±30	1598 - 1414	AD 353 - 537	

III.4.4. Résultats

Comme il est impossible en l'état de construire un modèle âge-profondeur fiable, les résultats obtenus par les différentes analyses réalisées ne sont pas interprétables, mais ils sont tout de même présentés en annexe, dans des diagrammes présentés en fonction de la profondeur (Annexe 11, 12, 13, 14).

Chapitre IV.

Histoire de la végétation



E. Gouriveau

Chêne et hêtre dans la forêt de Hanau

IV.1. Mise en place de la végétation régionale

La comparaison entre les sites de KOH, HOR et WAL permet de reconstruire la dynamique de la végétation régionale du Pays de Bitche depuis l'Holocène ancien jusqu'à nos jours (Figure IV.1-1). Les événements observés simultanément dans les trois sites permettent d'appréhender les modifications de la végétation à l'échelle régionale.

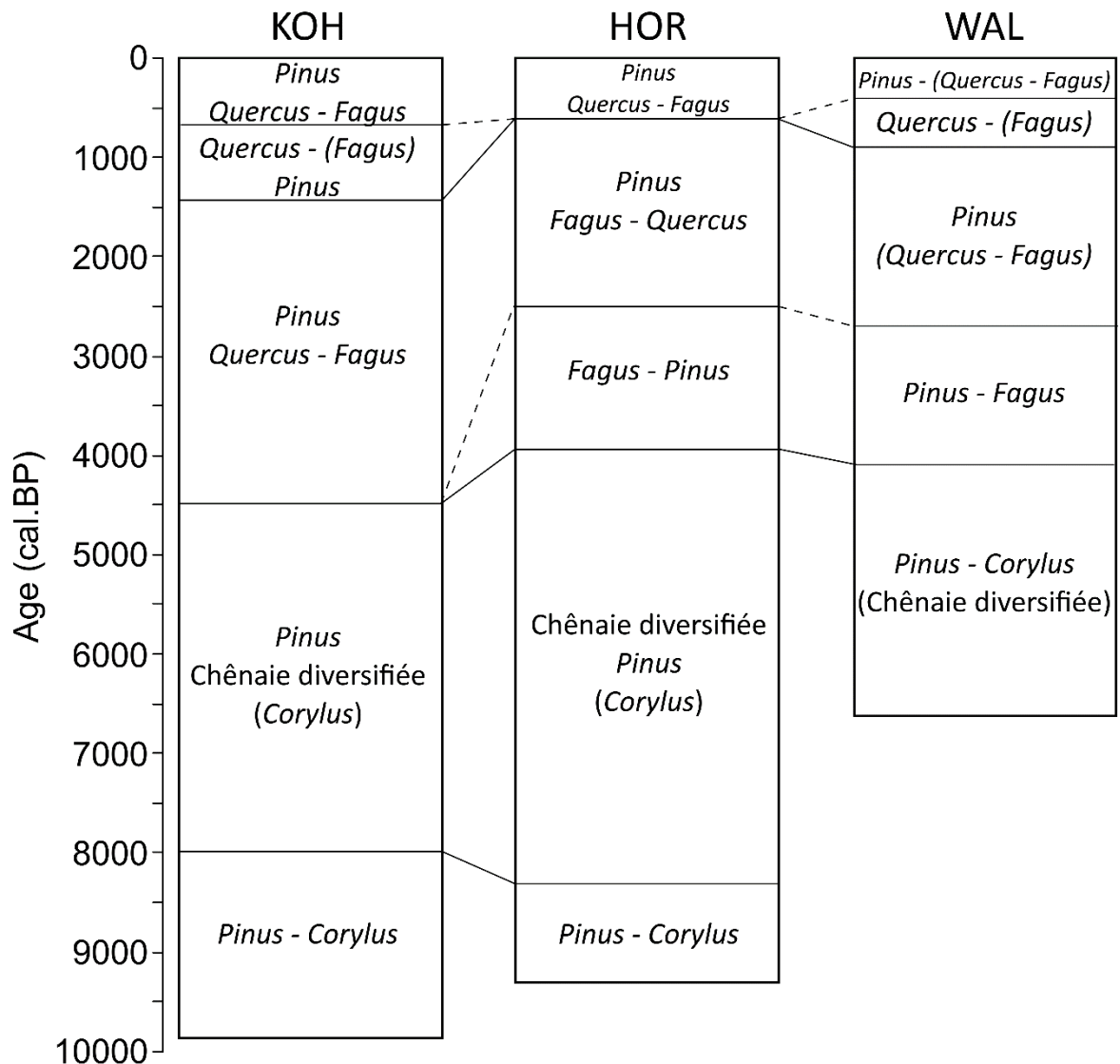


Figure IV.1-1 : Comparaison des essences dominantes dans les trois séquences étudiées. (Les parenthèses encadrent les essences secondaires bien représentées)

Dans les Vosges du Nord, les forêts dominent le paysage, avec des pourcentages extrêmement importants (jusqu'à 98% à KOH), depuis la base des séquences et jusqu'à 3000

cal. BP. Jusqu'à 8500 cal. BP, *Pinus* et *Corylus* sont les essences dominantes (Figure IV.1-2 (1)). Le pin reste largement présent aux côtés du noisetier avec des pourcentages atteignant 50%, alors qu'en dehors des Vosges du Nord, dans les Vosges et la Forêt Noire, et plus largement en Europe de l'ouest, les analyses polliniques indiquent essentiellement la présence de forêts de noisetiers (BEGEOT & DOYEN, 2019 ; DE KLERK, 2014 ; DRESCH *et al.*, 1966 ; JANSSEN *et al.*, 1975 ; RÖSCH, 2000). En effet, dans ces régions, le pin chute autour de 10000-9500 cal. BP et laisse sa place aux premiers arbres thermophiles, essentiellement le noisetier, mais aussi le chêne et l'orme. Sur le plateau lorrain, les analyses montrent cependant une première phase pendant laquelle le pin domine aux côtés du noisetier avant qu'il ne régresse (RUFFALDI, 1999 ; RUFFALDI *et al.*, 2015). Ainsi, dans le Pays de Bitche, le pin et le noisetier, en tant que taxons héliophiles, ont probablement formé des forêts claires et ouvertes : soit des forêts mixtes de pins et de noisetiers, soit des peuplements purs de pins et d'autres de noisetiers.

Après 8500 cal. BP, les éléments de la chênaie mixte, déjà présents auparavant (*Ulmus*, *Quercus*⁷, *Tilia*, *Fraxinus*) se développent au détriment du noisetier, alors que le pin reste toujours bien présent (Figure IV.1-2 (2)). Les données polliniques indiquent donc que le paysage dans la région de Bitche a évolué de la forêt de pins et de noisetiers post-glaciaire à une mosaïque de chênaies diversifiées (*Ulmus*, *Quercus*, *Tilia*, *Fraxinus*) et de peuplements de pins. Ainsi, à HOR, la chênaie diversifiée est la formation forestière principale au cours du Néolithique (7450-4150 cal. BP) avec *Quercus* qui domine l'environnement à partir de 6620 cal. BP alors qu'à KOH, *Pinus* reste dominant pendant toute cette période (GOURIVEAU *et al.*, 2020, Figure IV.1-3).

La transition vers une chênaie diversifiée peut être expliquée par le début de l'Optimum Climatique de l'Holocène (9000-5000 cal. BP), qui provoque le passage de conditions climatiques continentales prononcées avant 9000 cal. BP, à un climat plus chaud et humide (BRADLEY & BAKKE, 2019 ; DAHL-JENSEN *et al.*, 1998 ; KALIS *et al.*, 2003 ; MÄCKEL *et al.*, 2009).

La succession de végétation, caractérisée par le développement de la chênaie diversifiée, a été enregistrée dans toutes les séquences étudiées dans les Vosges, le Plateau Lorrain et la Forêt Noire, avec cependant, une présence beaucoup plus faible du pin dans les diagrammes

⁷ NB : le taxon pollinique *Quercus* comprend aussi bien le chêne pédonculé (*Quercus robur*) que le chêne sessile (*Q. petraea*)

polliniques (DE KLERK, 2014 ; DRESCH *et al.*, 1966 ; HATT, 1937 ; JANSSEN *et al.*, 1975 ; RÖSCH, 2000 ; RUFFALDI *et al.*, 2015 ; SUDHAUS, 2005).

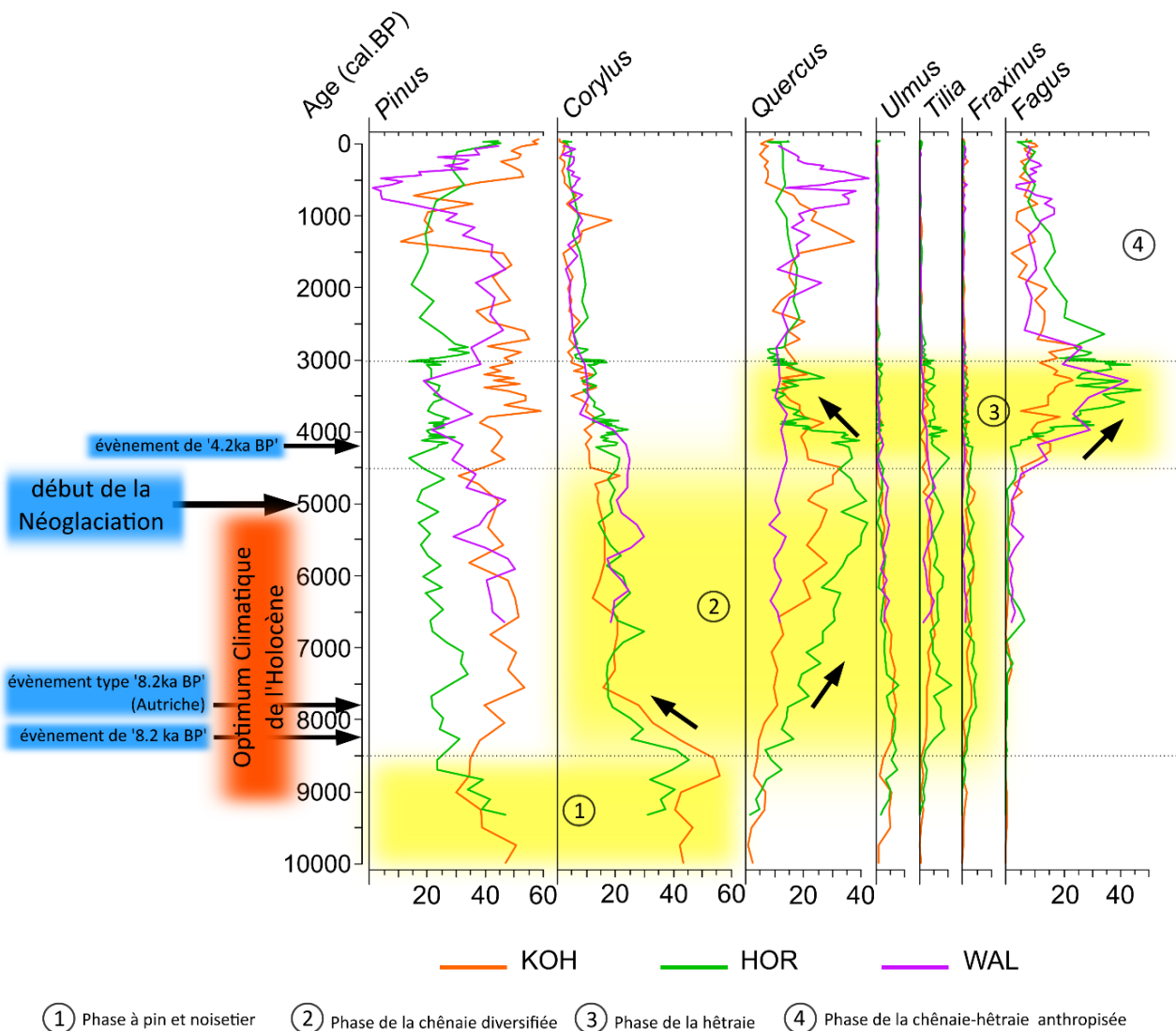


Figure IV.1-2 : Evolution des principales essences autour des sites étudiés et les principaux événements climatiques.

L'enregistrement de la tourbière de WAL débute vers 6625 cal. BP, pendant la phase de la chênaie diversifiée de l'Optimum Climatique de l'Holocène. Dans ce secteur, l'environnement est alors dominé par des forêts de pin accompagné de noisetier. La chênaie diversifiée est très réduite autour du site avec un pourcentage maximal de chêne de 14%, alors qu'il atteint 42% à HOR. À KOH, où le chêne atteint tout de même 33%, il semble que la chênaie peine également à s'installer face à la domination du pin. Ces observations sont en accord avec celles de Hatt (1937) qui observe la persistance de *Pinus* dans les spectres polliniques avec de forts

pourcentages, ce qui perturbe le développement de la chênaie diversifiée. Nous verrons par la suite (cf. IV.2) ce qui peut expliquer la persistance du pin dans cette région.

À partir de 7970 cal. BP à HOR et 7550 cal. BP à KOH, une première phase de développement de *Fagus* débute. Celui-ci atteint 2% vers 7305 cal. BP à KOH et 2,4% autour de 7220 cal. BP à HOR. Ce premier développement pourrait également être lié à la transition climatique de l'Optimum Climatique de l'Holocène et plus particulièrement à la fin des sécheresses estivales et des gelées printanières faisant suite à l'« événement de 8200 cal. BP » (« 8.2 ka event ») (Figure IV.1-2, TINNER & LOTTER, 2006). Selon Tinner et Lotter (2006, 2001), la transition vers un climat plus froid et plus humide, au cours de l'« événement de 8200 cal. BP », a pu contribuer au développement de *Fagus*. En effet, *Fagus* est une essence sensible au stress hydrique (sécheresse) et aux gelées tardives du climat continental et il se développe donc plutôt au cours des étés humides et des hivers doux du climat océanique (BRADSHAW *et al.*, 2010 ; TINNER & LOTTER, 2001). De plus, d'autres événements climatiques froids et humides similaire à celui de 8200 cal. BP ont été reconnus plus près de notre zone d'étude, comme par exemple un événement autour de 7800 cal. BP en Autriche qui pourrait expliquer le premier développement de *Fagus* dans les Vosges du Nord (TINNER & LOTTER, 2006).

Cependant, *Fagus* n'atteint pas de hauts pourcentages au cours de cette première phase et reste assez rare jusqu'à 4150 cal. BP à HOR, 4500 cal. BP à KOH et 4575 cal. BP à WAL, sans doute à cause de la durée trop courte des événements climatiques de type 8200 qui ne durent pas assez longtemps pour assurer son implantation. En revanche, à partir de ces dates, une nouvelle phase d'expansion de *Fagus* débute dans les trois sites. Cette nouvelle augmentation est, là encore, contemporaine d'un autre changement climatique (Figure IV.1-2 (3)). En effet, l'Optimum Climatique de l'Holocène prend fin autour de 5000 cal. BP, et la Néoglaciation débute, suite à un déclin des radiations estivales dans tout l'hémisphère nord dû à un changement orbital (BRADLEY & BAKKE, 2019). Le rapide « événement de 4200 cal. BP » (« 4.2 ka event ») s'inscrit dans ce contexte climatique et est enregistré en différents points du globe, menant localement à des conditions soit plus sèches, soit plus froides et/ou plus humides (BRADLEY & BAKKE, 2019 ; GEIRSDOTTIR *et al.*, 2019). Les températures diminuent alors graduellement jusqu'à 2000 cal. BP, favorisant le développement de *Fagus*, pour les mêmes raisons que lors de la première phase d'expansion (DAHL-JENSEN *et al.*, 1998). Par ailleurs, le retard observé entre la mise en place de la Néoglaciation et le début de l'extension continue

de *Fagus* dans les Vosges du Nord peut être expliqué soit par un délai de migration, peu probable car *Fagus* est déjà présent aux périodes antérieures, soit par un délai de mise en place des populations, probablement engendré localement par l'absence des conditions climatiques optimales retardant son installation massive dans les bassins versants de nos sites. Cet important développement des peuplements de hêtre autour du site de HOR, semble faire suite à l'« événement de 4200 cal. BP », qui a pu faciliter l'expansion du hêtre, en entraînant localement une augmentation des précipitations, qui lui sont favorables et qui auraient alors facilité son développement sur tous les versants des cuvettes.

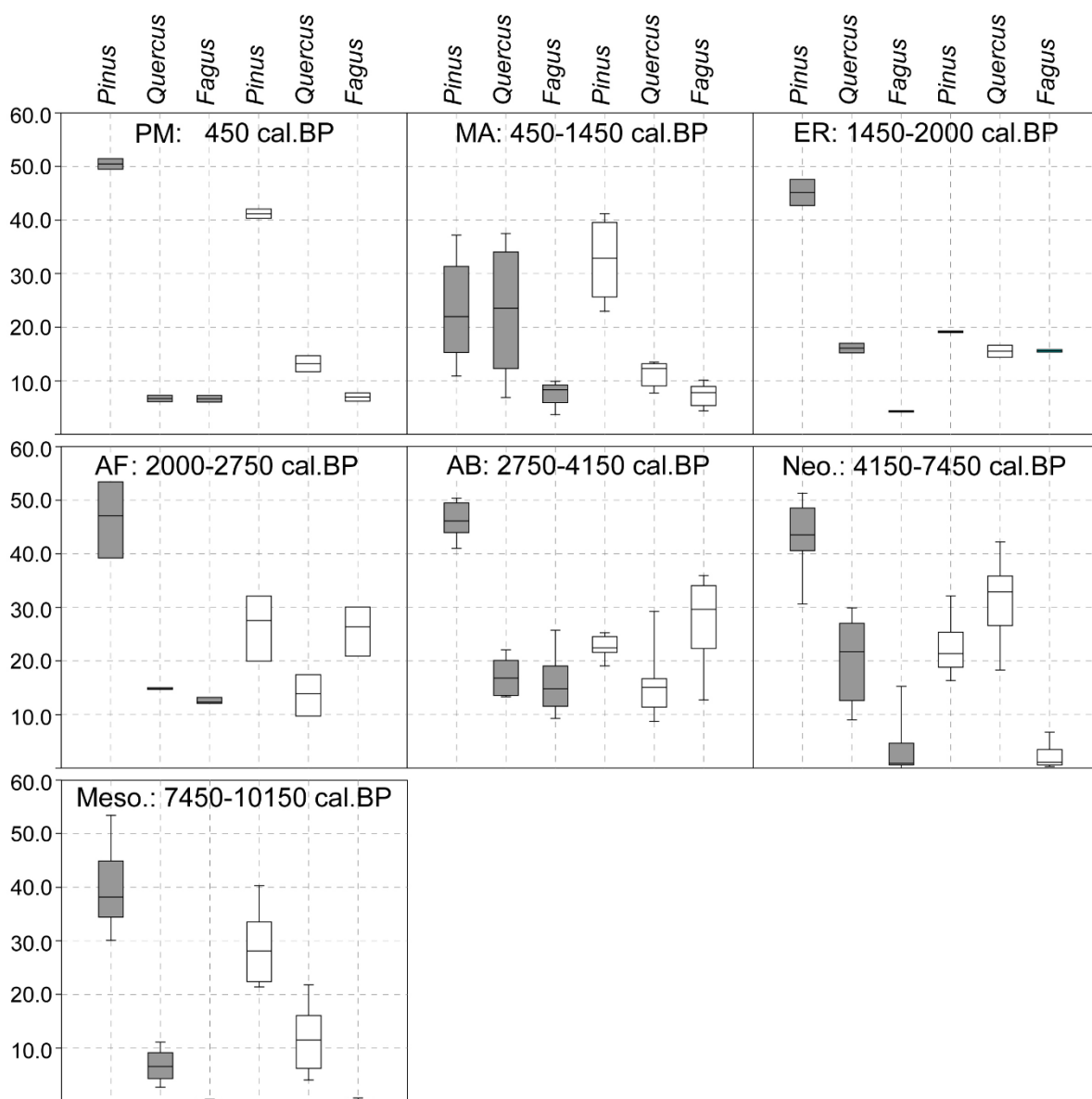


Figure IV.1-3 : Variations des pourcentages de *Pinus*, *Quercus* et *Fagus* pour les sites de KOH (en gris) et HOR (en blanc) et pour chaque période (Meso.: Mésolithique ; Neo.: Néolithique ; AB : âge du Bronze ; AF : âge du Fer ; ER : Époque romaine ; MA: Moyen Âge ; PM : Période moderne)

Nos résultats montrent qu'à HOR et à KOH, *Fagus* se propage dans les chênaies diversifiées et remplace les autres feuillus. Ceci s'explique par le fait que *Fagus* est un grand compétiteur, qui se développe sur une large gamme de type de sols et dans une large gamme de conditions climatiques (RAMEAU *et al.*, 1989). C'est également une espèce sciaphile⁸, contrairement aux autres feuillus plutôt héliophiles ou de demi-ombre (*Quercus*, *Ulmus*, *Tilia*, *Fraxinus*). Ainsi, à HOR, *Fagus* est bien établi et domine le spectre pollinique entre 3910 cal. BP et 2990 cal. BP (GOURIVEAU *et al.*, 2020, Figure IV.1-3). À WAL, *Fagus* se développe au détriment d'*Ulmus* et de *Tilia* mais surtout de *Pinus*, dont les pourcentages varient exactement à l'inverse de ceux de *Fagus* et n'atteignent plus que 20 % autour de 3290 cal. BP. Autour de ce site où le pin est largement dominant, le hêtre le concurrence probablement sur les sols les plus riches, favorables à son développement, et sur les versants nord, plus frais et moins soumis aux sécheresses auxquelles le hêtre est sensible. Le pin se limite alors aux stations particulières, telles que les dalles rocheuses et les zones tourbeuses. C'est ce que nous observons actuellement dans les cuvettes du Pays de Bitche où les hêtraies (-chênaies) acidiphiles, dont les essences principales sont le hêtre, le pin, le chêne, le sapin et le bouleau, se localisent sur les versants nord (BOEUF *et al.*, 2014).

Dans les trois sites, *Fagus* est accompagné d'*Abies*, déjà apparu au moment de la première phase d'expansion du hêtre et qui suit le même développement que ce dernier, restant cependant occasionnel (jamais plus de 4%) à cause de la localisation des sites d'étude, à la limite altitudinale de son aire de répartition naturelle (RAMEAU *et al.*, 1989).

Dans les régions voisines, telles que les Vosges Centrales et du sud, la Forêt Noire ou encore le Plateau lorrain, l'augmentation de *Fagus* a lieu autour de 6700-5500 cal. BP (DE KLERK, 2014 ; EDELMAN, 1985 ; JANSSEN *et al.*, 1975 ; RÖSCH, 2000 ; RUFFALDI *et al.*, 2015 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015). Le retard dans la propagation de *Fagus*, observé pour les sites du Pays de Bitche, est probablement dû à la présence de stations aux conditions édaphiques moins favorables à son développement. Ce dernier est peu compétitif sur les sols acides par rapport à d'autres essences comme le pin ou le chêne (RAMEAU *et al.*, 1989). De plus, le hêtre se développe exclusivement sur les versants des cuvettes, principalement les versants nord. Il ne se développe ni sur les dalles rocheuses, ni dans le fond des cuvettes. L'expansion du hêtre a donc sûrement été rendue difficile dans les cuvettes du Pays de Bitche, où le pin est resté beaucoup

⁸ Se développant dans l'ombre

plus présent que dans les autres régions étudiées et où il semble également avoir gêné le développement de la chênaie (cf. p. 197).

Autour de 3500-3000 cal. BP, le paysage commence à s'ouvrir autour des trois sites d'étude et les pourcentages de *Fagus*, après avoir atteint leur maximum, commencent à diminuer. Bien que la chute des pourcentages des pollens de hêtre soit souvent contemporaine de l'ouverture du milieu, les indices d'occupation humaine à cette époque sont limités autour des trois sites et il est donc peu probable que la régression du hêtre résulte d'un impact humain. En revanche, vers 3000 cal. BP, plusieurs régions d'Europe Centrale (Allemagne, Autriche, Suisse) enregistrent une modification du climat qui devient plus chaud et moins humide (VOIGT *et al.*, 2008). Cette phase est par exemple identifiée entre 3450 et 2850 cal. BP dans un lac en Allemagne, et pourrait donc expliquer la chute du hêtre, qui nécessite d'importantes précipitations annuelles et une humidité atmosphérique élevée (RAMEAU *et al.*, 1989 ; VOIGT *et al.*, 2008). Les valeurs des pourcentages du hêtre rejoignent ensuite celles du chêne et des chênaies-hêtraies semblent alors dominer le paysage à la place des hêtraies acidiphiles (Figure IV.1-2, 4). Suite à la chute du hêtre, le pin retrouve presque ses importants pourcentages du début de la séquence à Waldeck et reste l'essence dominante dans les trois sites.

C'est également à cette époque, autour de 3745 cal. BP à WAL, 3075 cal. BP à HOR et 2900 cal. BP à KOH, que *Carpinus* se développe comme l'atteste l'apparition des courbes polliniques continues de ce taxon (Figure IV.1-4). Dans les trois sites, le développement de *Carpinus* semble être contemporain des premières ouvertures et des premières installations humaines repérées par la présence de certains IPA (essentiellement *Plantago lanceolata* mais également *Rumex* ou *Artemisia* en fonction des sites), de spores de champignons coprophiles et des phénomènes d'érosion (Figure IV.1-4). Selon Huntley *et al.* (1989), *Carpinus*, comme *Picea* et *Fagus*, nécessite une perturbation humaine dans les forêts denses pour pouvoir s'y propager (voir aussi Küster 1997). Le charme, poussant préférentiellement sur les sols riches en minéraux nutritifs et sur les zones perturbées va ainsi s'installer sur les zones de bas de pente que les phénomènes d'érosion ont enrichi en nutriments minéraux.

Près du site de HOR, deux faibles présences (0,2-0,4%) du châtaignier sont enregistrées pour les périodes de l'âge du Bronze et de l'âge du Fer, plus ou moins contemporaines des ouvertures du paysages. Dans les régions voisines, le châtaignier, qui est une espèce exotique, n'est mentionnée qu'à partir de la période romaine (Figure IV.1-4, DE KLERK, 2014 ; MARIET *et*

al., 2016 ; RÖSCH, 2000). Dans les Vosges du Nord, les rares présences du châtaignier correspondent donc probablement à des individus isolés qui se sont naturellement propagés à la faveur du climat, des sols, des ouvertures et des activités agro-pastorales, qui ont facilité sa propagation (LEROYER, 2010).

L'évolution de la végétation dans les parties supérieures des séquences (3000 dernières années) varie d'un site à l'autre en fonction de l'histoire humaine et de la pression anthropique autour des sites. Ces évolutions seront étudiées en détail dans le chapitre suivant.

Cependant, nous pouvons tout de même noter que, par la suite, le pin va subir une importante chute de ses pourcentages au profit du chêne dans les séquences de KOH et WAL. Le sommet des trois séquences est caractérisé par le retour des forts taux de boisement observé pour l'Holocène moyen (8200-4200 cal. BP, (WALKER *et al.*, 2012), auxquels contribuent essentiellement le pin. De plus, à HOR et KOH, l'épicéa se développe également au sommet des séquences, bien avant les plantations pratiquées au milieu du XIX^{ème} siècle.

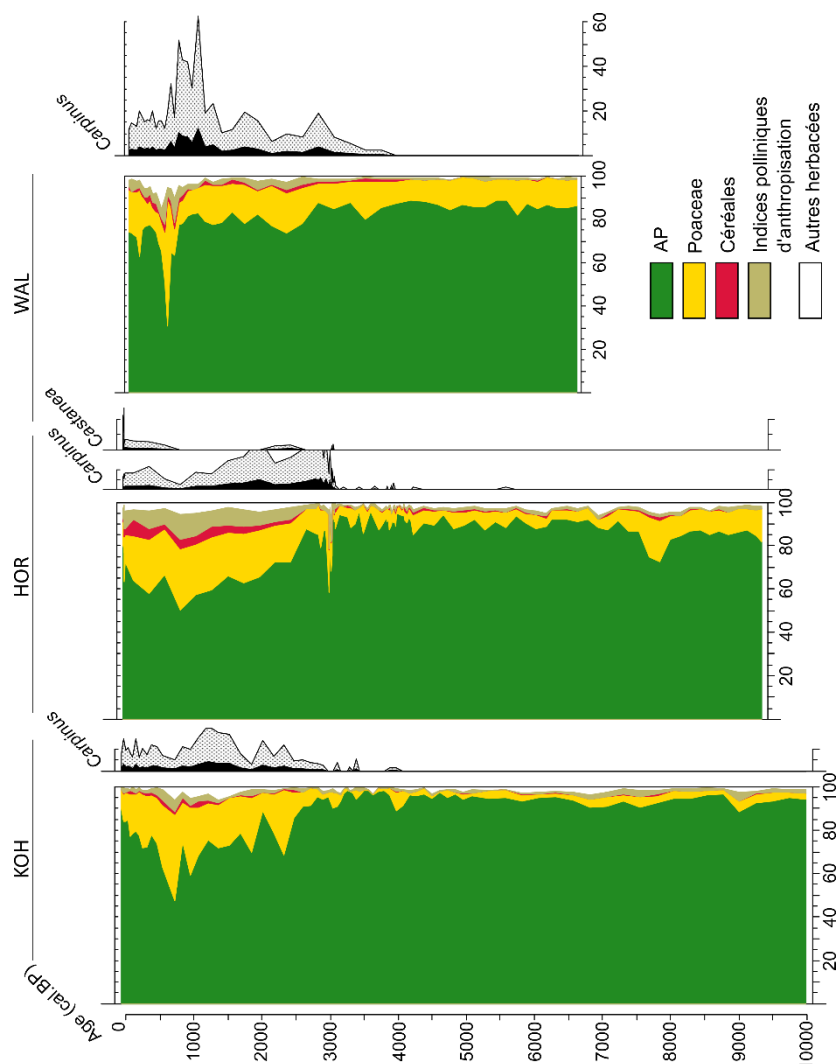


Figure IV.1-4 : Courbes polliniques de *Carpinus* et de *Castanea* et bloc diagramme synthétique des trois séquences étudiées

Les variations polliniques du bouleau n'ont pas été interprétés dans l'histoire de la végétation régionale et sera traité comme faisant partie de la végétation locale. En effet, les pourcentages de pollens de *Betula* ne suivent pas les grandes variations des principaux taxons arborés de la végétation régionale, discutées dans cette partie. De plus, la découverte de fragments d'étamines dans de nombreux échantillons indique une présence locale de ce taxon et, dans nos séquences, les pourcentages du bouleau évoluent principalement en fonction de ceux des taxons inféodés à la zone humide (*Alnus*, *Salix*, *Cyperaceae*...). Il semblerait donc que la principale espèce représentée ici est *Betula pubescens*, espèce acidiphile poussant sur les sols humides à gorgés d'eau (RAMEAU *et al.*, 1989).

Ainsi, la succession de végétation que nous pouvons reconstruire pour le Pays de Bitche s'inscrit bien dans la dynamique identifiée dans les régions voisines (Vosges Centrales et du sud, Forêt Noire, Plateau Lorrain), même si l'absence de datations absolues dans de très nombreuses séquences ne permet que rarement une comparaison des chronologies. Nos résultats sont plus ou moins cohérents avec les analyses antérieures réalisées par HATT (1937) dans les Vosges du Nord avec cependant une phase de chênaie diversifiée mieux perçue dans nos diagrammes. De même, une analyse pollinique ancienne réalisée par Firbas (1934) dans le Palatinat (Allemagne), montre une succession forestière proche de celle reconstituée dans cette étude, confirmant que la comparaison de nos trois séquences permet de mettre en évidence un signal régional (FIRBAS, 1934).

Cependant, nos données mettent en évidence des particularités des enregistrements des Vosges du Nord par rapport à ceux des régions voisines. L'une d'elle, déjà pressentie par les analyses polliniques sommaire des années 30, concerne la présence particulière du pin.

IV.2. Le cas du pin dans les Vosges du Nord

La présence et l'évolution du pin dans les Vosges du Nord au cours de l'Holocène diffèrent de ce qui est observé dans le reste des Vosges puisqu'il est un des taxons dominants dans nos séquences, alors que le diagramme théorique des Vosges montre qu'il chute jusqu'à de très faibles pourcentages (<10%) autour de 10000 cal. BP (DE KLERK, 2014 ; GUILLET *et al.*, 1976). Comme nous l'avons vu, de nombreuses études polliniques menées dans les Vosges (DRESCH *et al.*, 1966 ; FIRBAS *et al.*, 1948 ; HATT, 1937 ; JANSSEN *et al.*, 1975), dans la Forêt Noire (RÖSCH,

2000 ; SUDHAUS, 2005) et sur le Plateau Lorrain (GUILLET *et al.*, 1972 ; RUFFALDI, 1999 ; RUFFALDI *et al.*, 2015) montrent également cette importante chute du pin qui reste extrêmement rare tout au long du reste de l'Holocène (Figure IV.2-1).

Pinus sylvestris est une espèce rustique, peu exigeante quant aux caractéristiques physico-chimiques et à la fertilité du sol. Il pousse sur une large gamme de sols mais préfère les sols siliceux, légers et sableux, tolérant les sols pauvres et acides. *Pinus* n'est sensible ni au froid, ni aux gelées tardives et aux sécheresses estivales. C'est une espèce héliophile pionnière, qui est capable de se régénérer rapidement. Il peut pousser dans des zones extrêmes comme des affleurements rocheux ou des tourbières. Son aire de répartition naturelle couvre une large partie de l'Eurasie mais est fragmentée dans sa partie occidentale.

En Lorraine, les forestiers du XIX^{ème} siècle pensent assez souvent que le pin n'a qu'une origine artificielle dans les forêts de la région (GUINIER, 1959) et c'est pourquoi son indigénat dans les Vosges a longtemps été discuté (GUINIER, 1959 ; MULLER, 2005 ; MULLER & GENOT, 1991). Selon MULLER & GENOT (1991), les peuplements de pin dans des zones extrêmes (sable, affleurement rocheux, tourbe) sont des reliques de la période post-glaciaire pendant laquelle le pin était plus répandu. La compétition avec les feuillus a limité le pin dans des zones où les caractéristiques du sol et les conditions climatiques permettaient son développement. En effet, les feuillus et principalement *Fagus*, qui est le compétiteur principal du pin, ne poussent pas sur les sols des escarpements gréseux, très secs et pauvres (DIEDERICH & SCHWENNINGER, 1990).

De nombreux indices (palynologiques, botaniques, historiques, génétiques...) indiquent que le pin est natif et pousse spontanément dans plusieurs régions des Vosges, dont les Vosges du Nord et surtout la région de Bitche (GUINIER, 1959 ; MULLER, 2005). Des études dendrométriques ont même mis en évidence l'existence, dans le Pays de Bitche et le Palatinat, d'un type particulier de pin dit « intermédiaire » ou « race de Hanau » dont les caractéristiques se situent entre celles du type de plaine présent dans la plaine rhénane et celles du type de montagne, que l'on trouve dans les Vosges Moyennes et les Hautes Vosges (GUINIER, 1959 ; MULLER, 2005).

La persistance du pin dans les Vosges du Nord pendant l'Optimum Climatique de l'Holocène a déjà été observée par ailleurs. Dans les Vosges gréseuses, les anciennes études notaient déjà que le pin n'a été éliminé que sur les sols riches par les feuillus tels que *Quercus* ou *Fagus* mais a persisté sur les milieux plus extrêmes (sols sableux très pauvres et acides) où *Quercus* et *Fagus* devenaient moins compétitif (DUBOIS, 1939 ; GUILLET *et al.*, 1976 ; HATT, 1937).

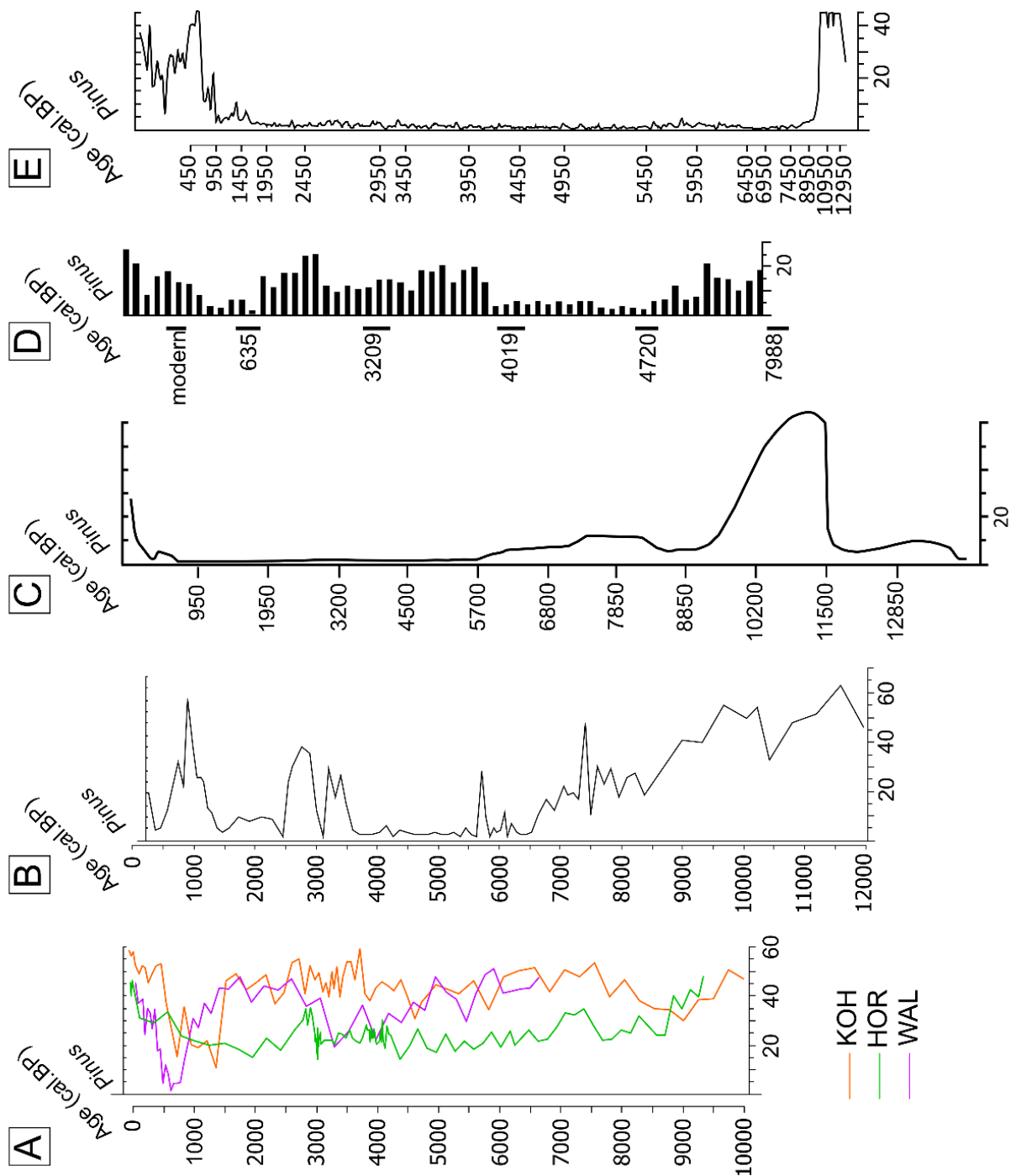


Figure IV.2-1 : Courbes polliniques de *Pinus* enregistrées dans plusieurs sites des régions voisines. A : tourbières des Vosges du Nord de cette étude, B : site de Francaltroff (Moselle) (RUFFALDI *et al.*, 2015), C : courbe du pin du diagramme théorique des Vosges (DE KLERK, 2014), D : site du Rond Pertuis Supérieur (Hautes Vosges gréseuses) (SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015), E : site de Steerenmoos (Forêt Noire) (RÖSCH, 2000)

De plus, la persistance du pin dans nos sites n'est pas un phénomène local. Puisque l'analyse pollinique de la tourbière du Rond Pertuis supérieur, localisée dans le massif du Donon à 690 m d'altitude et à plus de 60 km au sud-ouest de nos sites, a également révélé la longue persistance du pin (15% à la fin de l'Atlantique), là aussi due aux caractéristiques physico-chimiques d'un sol développé sur le grès (Figure IV.2-1, D, SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015).

D'autres travaux ont aussi étudié les populations de pin poussant sur les escarpements gréseux du Luxembourg (DIEDERICH & SCHWENNINGER, 1990 ; LEESCH *et al.*, 2017). Dans ce cas, comme dans le cas des Vosges du Nord, durant les derniers 10000 ans *Pinus* reste à des pourcentages plus ou moins importants dans les diagrammes polliniques et pousse à présent sur les affleurements gréseux. Sur la base d'études palynologiques, phytosociologiques, écologiques et génétiques, le statut indigène du pin a été reconnu pour cette région et sa persistance pendant l'Holocène, sur les sols pauvres et secs et sur les escarpements gréseux, s'explique par sa compétitivité sur ces sols, par rapport aux feuillus.

En dehors de ces régions gréseuses, une importante présence du pin est également attestée actuellement dans la forêt indivise de Haguenau (situé à 30-35 km au sud-est des sites), dont un tiers de la surface est occupée par le pin sylvestre (34% des essences) et où celui-ci est considéré comme spontané (CONSTANCIO & BAROCHE, 2020 ; GUINIER, 1959). Là encore, la carte géologique indique que cette forêt se situe essentiellement sur d'anciennes alluvions sableuses formant un recouvrement siliceux pauvre, et cela confirme la persistance du pin sylvestre sur ces types de sols (MENILLET, 2015).

Bien que le pin reste l'un des taxons dominants dans nos trois séquences, la comparaison de ses proportions par rapport à celles du chêne et du hêtre diffère dans les trois sites (GOURIVEAU *et al.*, 2020, Figure IV.1-3). En effet, alors que *Pinus* reste le taxon arboré principal tout au long de la séquence de KOH et de WAL, excepté au Moyen Âge, *Pinus*, *Quercus* puis *Fagus* deviennent successivement l'essence dominante de la séquence de HOR. Cette différence entre les séquences semble être liée à la topographie et au relief des bassins versants des tourbières. En effet, les tourbières de KOH et de WAL sont situées au fond d'étroites vallées, entourées de nombreux reliefs gréseux dont les pentes sont principalement orientées au sud et qui se trouvent directement à proximité des tourbières (cf. Figures III.2-1 et III.3-1). À l'inverse, la tourbière de HOR s'étend dans la « cuvette » de Bitche, une vallée beaucoup plus ouverte, où les reliefs sont localisés à plus grande distance du site de prélèvement (cf. Figure

III.1-1). Ainsi, le pin qui s'établit préférentiellement sur les versants secs et pauvres, exposés au sud, trouve plus de zones favorables à proximité des tourbières de KOH et de WAL qu'à proximité de celle de HOR. De plus, la tourbière de HOR est plus proche des couches géologiques carbonatées du Muschelkalk et des étendues loessiques du Plateau Lorrain et bénéficie peut-être d'apports hydriques riches en cations et carbonates bénéfiques aux feuillus qui y sont plus compétitifs que le pin (BLANALT *et al.*, 1967).

Ces observations doivent toutefois être considérées avec précaution à cause de la possibilité d'une sur-représentation de *Pinus* dans les diagrammes polliniques, puisque ses pollens sont produits en grande quantité et bien dispersés, parfois sur de longues distances. De plus, *Pinus* peut également être une espèce locale, poussant directement sur la tourbière. En ce sens, une étude récente des macro-restes menée dans la tourbière de Kobert-Haut a révélé la présence de fragments carbonisés de pin datés autour de 2650 ± 35 cal.BC (GOUBET, 2014).

Cependant, il semble peu probable que le pin soit uniquement présent sur la tourbière ou qu'il soit sur-représenté dans les diagrammes polliniques. En effet, les échantillons supérieurs des séquences sont datés, d'après les modèles âge-profondeur, de 1906, 1996 et 2015 respectivement pour WAL, HOR et KOH. Ces échantillons « de surface » donnent ainsi une image de la végétation telle qu'elle était après les importantes plantations de pin qui ont été réalisées au XIX^{ème} siècle. Or, les pourcentages de pin dans ces échantillons sont équivalents à ceux observés au cours de l'Holocène, laissant à penser que le pin était alors au moins autant répandu qu'actuellement.

Le pin a donc été une essence dominante dans le paysage du Pays de Bitche au cours du temps. Même après une importante chute de ses pourcentages au Moyen Âge à KOH et sa quasi-disparition à WAL, il retrouve ses pourcentages d'origine et constitue, dans les trois sites, l'une des essences principales du reboisement spontané des zones abandonnées à la fin du Moyen Âge et à l'époque moderne. Une autre espèce de conifère se développe également à ces époques et sera, elle aussi, planté au cours du XIX^{ème} siècle : l'épicéa.

IV.3. Le cas de l'épicéa

L'épicéa est présent sporadiquement dans les séquences de HOR, KOH et WAL depuis respectivement 8120 cal. BP, 7800 cal. BP et 7540 cal. BP. Il est délicat d'interpréter la signification de ces pollens, dont les pourcentages oscillent entre 0,1% et 1,1%. En effet, des analyses de pluie pollinique actuelle ont montré que l'épicéa est très souvent sous-représenté dans les diagrammes polliniques (LATALOWA & VAN DER KNAAP, 2006). De plus, de nombreuses études croisant données polliniques et macro-restes ont montré qu'un pourcentage pollinique de 0,5% suffisait pour indiquer la présence locale de l'arbre. Il faut également prendre en compte que nos sites se trouvent à la limite occidentale de l'aire de répartition de l'épicéa en Europe que constitue le nord-est de la France (LATALOWA & VAN DER KNAAP, 2006).

Comme pour le pin, l'indigénat de l'épicéa dans les Vosges a également été discuté dans plusieurs études (DRESCH *et al.*, 1966 ; DUBOIS, 1939 ; GUINIER, 1959 ; KALIS, 1984 ; KALIS *et al.*, 2006 ; LEMEE, 1955). L'hypothèse la plus répandue affirmait que *Picea* n'était pas indigène dans les Vosges et que son développement au sommet des séquences résultait uniquement d'une introduction humaine (DRESCH *et al.*, 1966 ; DUBOIS, 1939 ; GUINIER, 1959 ; LEMEE, 1955).

La grande rareté des pollens de l'épicéa caractérise tous les enregistrements polliniques obtenus dans les Vosges (Figure IV.3-1, DUBOIS, 1939 ; KALIS, 1984). Dans les Hautes Vosges (Figure IV.3-1, B, C, D), différentes études polliniques montrent que les premiers grains de pollen d'épicéa apparaissent autour de 7500 BP (soit vers 8300 cal. BP), comme observés dans les séquences de HOR et KOH. Il est ensuite présent sporadiquement tout au long des séquences puis augmente et se développe uniquement à leur sommet, généralement à partir de 350 BP (soit autour de 400 cal. BP) dans la majorité des séquences (KALIS, 1984).

Pour expliquer la rare présence des grains de pollen d'épicéa avant son expansion très récente, plusieurs études ont suggéré des apports lointains de pollen, essentiellement en provenance de la Forêt Noire (à moins de 100 km à l'est des Vosges) (DUBOIS, 1939). L'épicéa se propage en Forêt Noire autour de 3180 cal. BP et atteint son expansion maximale entre 2200 et 960 cal. BP (KALIS, 1984). Des analyses polliniques récentes menées dans la Forêt Noire ont attesté d'une première augmentation des grains de pollen d'épicéa autour de 4800-3800 cal. BP (Figure IV.3-1, E, RÖSCH, 2009, 2007, 2000).

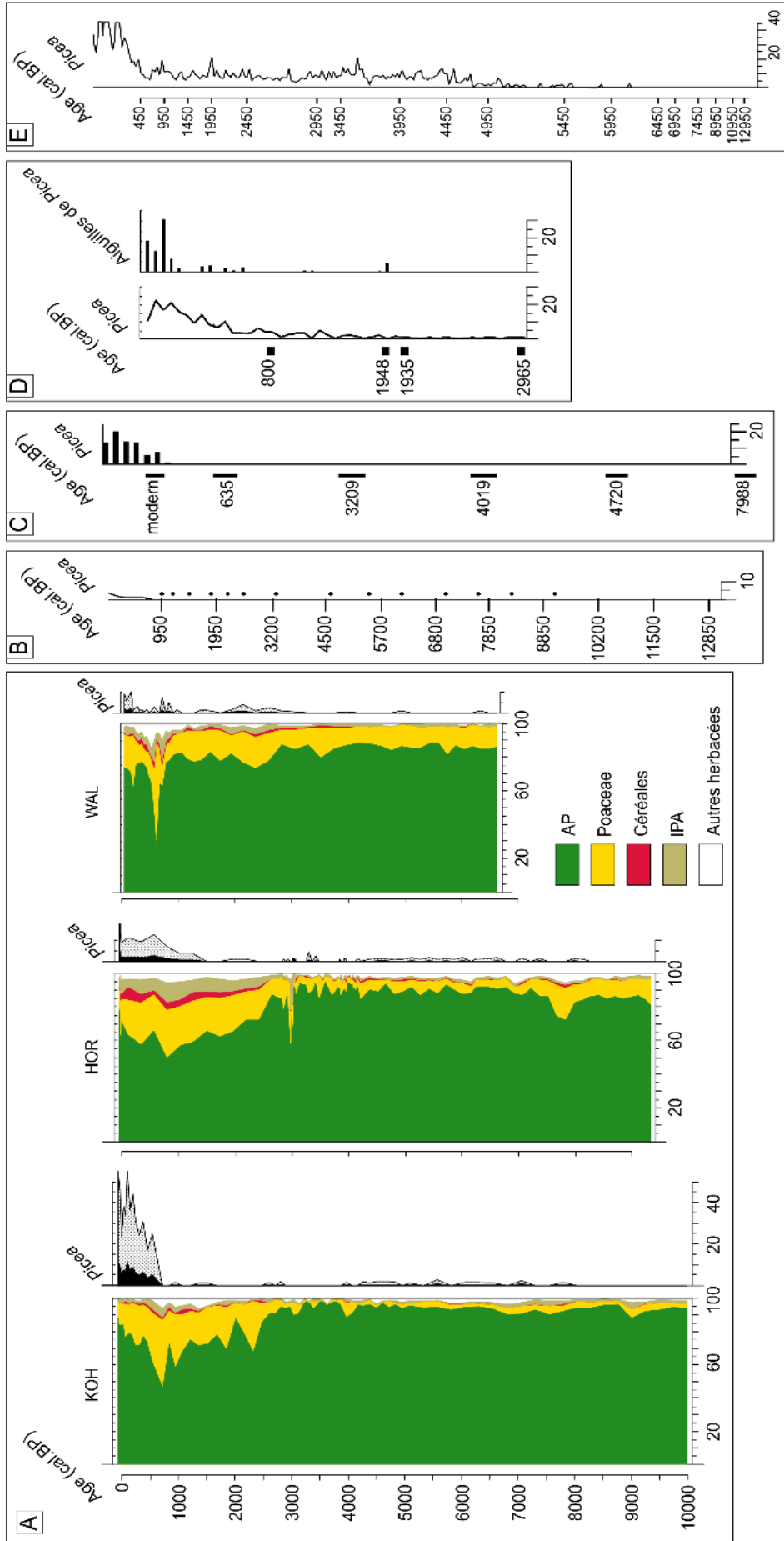


Figure IV.3-1 : Courbes polliniques de *Picea* dans différents sites des régions voisines des sites étudiés. A : courbe de *Picea* dans les trois sites d'étude et bloc diagramme synthétique des séquences, B : courbe pollinique du diagramme théorique des Vosges (DE KLERK, 2014), C : site du Rond Pertuis supérieur (Hautes Vosges gréseuses) (SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015), D : site de la Grande Basse (Vosges Centrales) (KALIS, 1984, KALIS *et al.* 2006), E : Site de Steerenmoos (Forêt Noire) (RÖSCH 2000)

Avant cette période, l'épicéa n'est présent, depuis 10000-9000 cal. BP, que sous la forme de grains de pollen isolés comme observé dans les séquences des Vosges du Nord. Ainsi, les premiers grains de pollen d'épicéa enregistrés dans les séquences de HOR et KOH, respectivement autour de 8120 cal. BP et 7800 cal. BP ne peuvent pas provenir d'apports lointains depuis la Forêt Noire, celle-ci n'étant pas assez riche en épicéa à ces dates pour justifier ce type d'apport.

La propagation de *Picea* atteint le Jura entre 6700 et 5960 cal. BP, les Alpes françaises entre 4200 et 2900 cal. BP et finalement la Forêt Noire autour de 3180 cal. BP (KALIS, 1984). Dans ce contexte de migration, Kalis (1984) estime l'arrivée probable de l'épicéa dans les Vosges entre 2200 et 1400 cal. BP et Latałowa et van der Knaap (2006) datent son expansion dans les Vosges entre 2ka BP et 1ka BP. Sa présence dans les Vosges Centrales est d'ailleurs attestée dans une séquence de la vallée de la Grande Basse par une augmentation importante des pourcentages autour de 1400 cal. BP, indiquant la croissance d'arbres près du site (Figure IV.3-1, D, KALIS *et al.*, 2006). De plus, la découverte d'aiguilles d'épicéa, directement datées de 1994±54 BP (2066-1825 cal. BP), confirme sa présence locale (Figure IV.3-1, D, KALIS, 1984).

L'augmentation de *Picea* enregistrée dans nos séquences est datée autour de 1260 cal. BP (690 cal.AD) à HOR et autour de 530 cal. BP (1420 cal.AD) à KOH (Figure IV.3-1, A), soit bien avant les plantations d'épicéa débutées au XIXème siècle. Bien que la présence locale de l'épicéa puisse difficilement être affirmée avant ces dates, dans les Vosges du Nord celle-ci n'est pas incohérente autour de ces dates puisque sa présence est avérée à la Grande Basse dans les Vosges.

De plus, l'augmentation de l'épicéa dans nos sites est contemporaine du maximum d'ouverture du paysage puis de la diminution des NAP et des indices polliniques d'anthropisation (Figure IV.3-1, A). *Picea* est une essence sensible à la compétition des feuillus, tels que *Fagus*. Il est naturellement limité dans des zones isolées, sur des sols pauvres et acides ainsi que sur la tourbe (GUINIER, 1959 ; KALIS *et al.*, 2006). Cependant, quand les populations humaines ont commencé à déboiser les forêts, dès le Néolithique (7450-4150 cal. BP) et après l'exploitation excessive des forêts de feuillus, *Picea*, en tant qu'arbre pionnier, a pu se propager, comme nous pouvons le déduire également de nos séquences, surtout sur les sols hydromorphes qu'il supporte bien (GUINIER, 1959 ; KALIS *et al.*, 2006 ; LATALOWA & VAN DER KNAAP, 2006 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015).

Dans la séquence de Waldeck, le pollen d'épicéa atteint un premier maximum de 1,5% autour de 718 cal. BP, mais contrairement à ce qui est observé à HOR et KOH, il montre une courbe continue bien plus tard, uniquement au sommet de la séquence, c'est-à-dire à partir de 158 cal. BP (1792), et les valeurs atteintes sont beaucoup plus faibles. Ce léger développement de l'épicéa se rapproche de la période des plantations d'épicéa et de pin du milieu du XIX^{ème} siècle. Autour du site de Waldeck, la courbe des pollens arboréens montre qu'au Moyen Âge le milieu s'ouvre très brièvement et qu'il est très rapidement recolonisé par le chêne, le hêtre et surtout le pin qui domine l'assemblage pollinique depuis le début de la séquence. Si l'on considère que l'épicéa a effectivement besoin d'une ouverture pour se propager dans les forêts de feuillus, l'ouverture a probablement été trop localisée et trop brève autour du site de Waldeck pour favoriser sa propagation dans les zones abandonnées, très vite recolonisées par les autres essences.

La présence de l'épicéa dans les Vosges du Nord, bien avant les plantations, était jusqu'alors inconnue et on le croyait exclusivement importé par l'homme. Nos résultats font état ici de sa propagation naturelle, à la faveur des ouvertures anthropiques, autour de nos sites d'étude.

IV.4. Mise en place de la végétation locale

Les tourbières de HOR et KOH présentent une dynamique de leur végétation locale assez similaire, alors que celle de la tourbière de WAL diffère (Figure IV.4-1).

Les enregistrements de HOR et KOH débutent dans une zone humide, potentiellement en bord d'un cours d'eau, dont la présence proche est attestée par un cortège de plantes aquatiques : *Potamogeton*, *Typha latifolia*, *Typha/Sparganium*, *Alisma*, *Lythrum* (Figure IV.4-2, 1). Parmi elles, *Potamogeton* est actuellement observé dans les cours d'eau (principalement *P. polygonifolius*) et les plans d'eau (principalement *P. natans*) des Vosges du Nord alors que les autres taxons cités sont présents sur les berges. Au point de prélèvement, les Poaceae, *Typha latifolia* et *Typha/Sparganium* ainsi que les Cyperaceae composent probablement une mosaïque de roselières et de cariçaies, en marge desquelles se trouve une mégaphorbiaie mésotrophe indiquée par la présence de *Filipendula* qui est bien représenté à HOR, alors que *Lythrum* peut être présent dans toutes les formations. Les sphaignes sont présentes dans la strate muscinale, alors que le bouleau et le saule, typiques des milieux humides, sont les arbres

pionniers qui dominent en périphérie de la mégaphorbiaie. À KOH, l'aulne y est également présent temporairement. Cette mégaphorbiaie se développe sur les sols humides dont l'humidité est assurée par la présence d'une couche argileuse à la base des séquences, assurant l'imperméabilité du fond de vallon irrigué par le cours d'eau dont la divagation est facilitée par la topographie à très faible pente du fond de la « cuvette ».

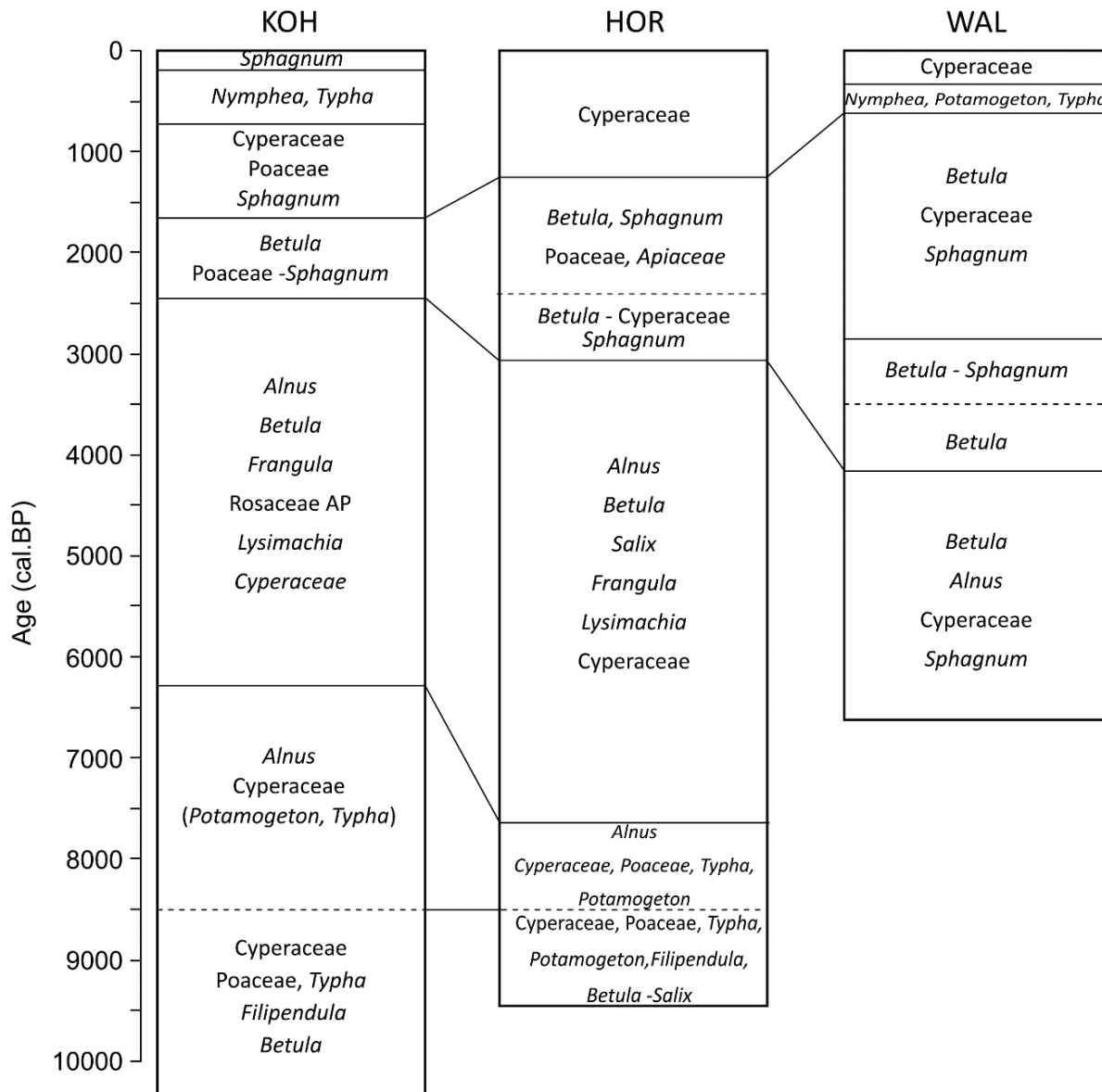


Figure IV.4-1 : Comparaison des principaux taxons des trois séquences étudiées.

Autour de 8550 cal. BP, parallèlement à la chute régionale de *Corylus* et à la faveur du changement climatique lié à la mise en place de l'Optimum Climatique de l'Holocène (cf. IV.1.), l'aulne colonise progressivement les zones humides devenues marécageuses. Le climat plus humide et la fin des sécheresses estivales entraînent une augmentation du niveau et donc une

inondation permanente des fonds de vallon, qui engendre l'arrêt des processus de dégradation de la matière organique et ainsi le démarrage de la turfigenèse dans les sites de HOR et KOH. Les sites vont alors suivre une dynamique naturelle de comblement par accumulation de restes végétaux et de bois mort augmentant le taux de matière organique dans le sédiment comme le montre les résultats de la perte au feu. La géomorphologie des fonds de vallon du Pays de Bitche et la présence de ces nouveaux sols marécageux ont alors localement favorisé la propagation de l'aulne dans les Vosges du Nord, depuis ses zones refuges (les péninsules du sud, les régions septentrionales de l'Europe occidentale, les contreforts des Alpes, les Carpates et l'Europe du nord-est, d'après DOUDA *et al.* (2014)).

À partir de 7670 cal. BP et 6315 cal. BP, respectivement dans les sites de HOR et KOH, l'aulnaie marécageuse est bien établie dans les fonds de vallon marécageux et les forts pourcentages constants des pollens d'aulne montrent qu'elle atteint son extension maximale au cours du Néolithique (7450-4150 cal. BP) (Figure IV.4-2, 2). Les taxons caractéristiques des aulnaies marécageuses sont alors bien représentés dans l'enregistrement pollinique qui atteste toujours d'un milieu mésotrophe (BOEUF *et al.*, 2014). L'aulne structure la strate arborée, plus ou moins accompagné par le bouleau. Le saule, la bourdaine et les Rosaceae arborescents, probablement le sorbier des oiseleurs, composent la strate arbustive. La strate herbacée possède un recouvrement important dans ce type de formation, où les hygrophiles et les aquatiques colonisent les zones les plus engorgées qui restent ouvertes.

Sur les sites de HOR et KOH, *Lysimachia* est bien représentée dans la phase de l'aulnaie marécageuse. Il s'agit sûrement ici de *Lysimachia vulgaris* (grande lysimaque ou lysimaque commune) qui se développe dans les milieux ouverts humides et acides, oligo-mésotrophes, ainsi que dans les forêts humides (LAUBER *et al.*, 2018). La présence locale des arbres et le développement de l'aulnaie marécageuse au niveau de point de prélèvement sont également confirmés par l'augmentation des concentrations des spores de *Kretzschmaria deusta* (HdV 44), qui est un champignon parasite très fréquent sur les feuillus, dont *Alnus*, *Betula* et *Salix* (VAN GEEL & APTROOT, 2006).

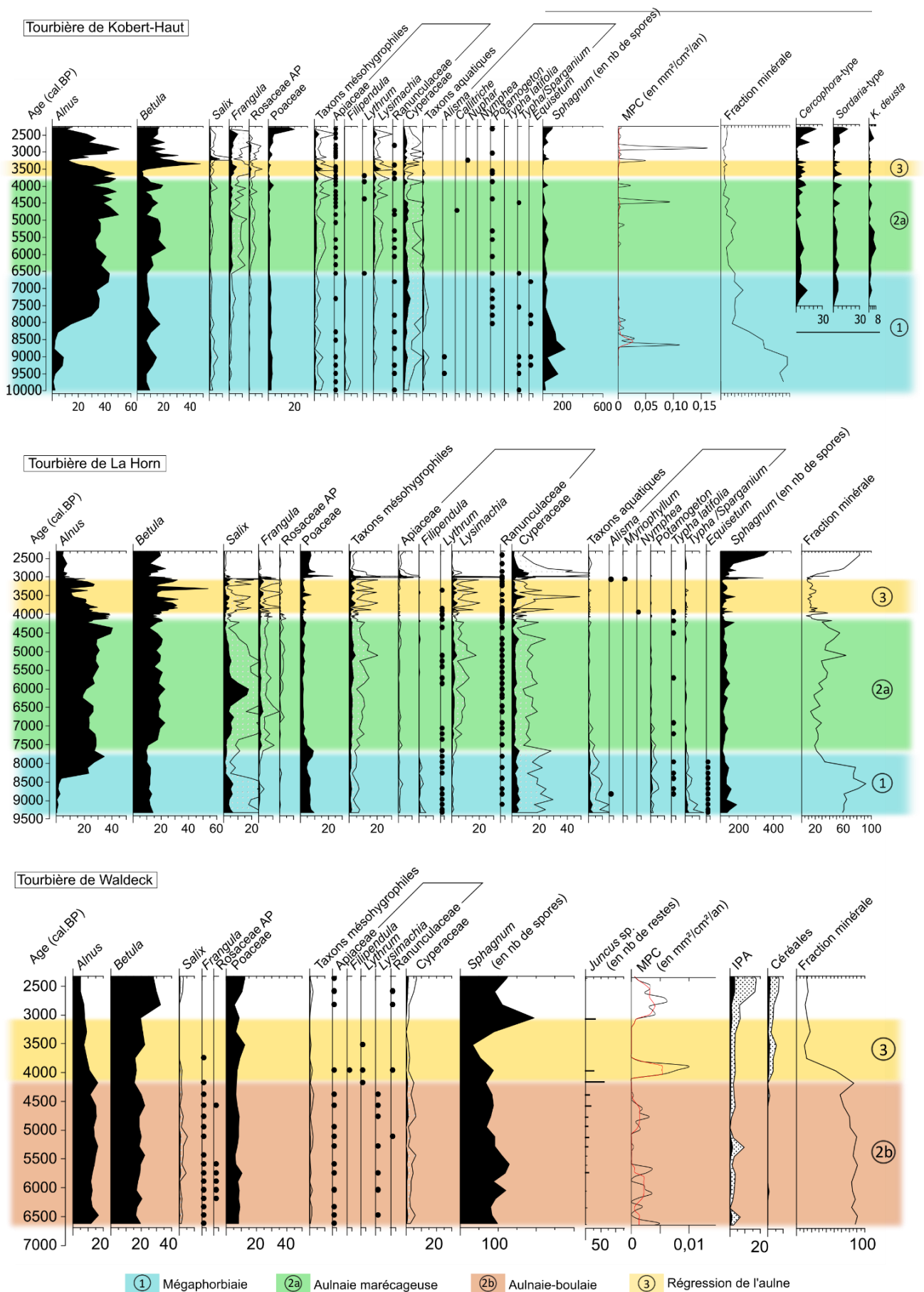


Figure IV.4-2 : Les différentes phases d'évolution de la végétation locale jusqu'à 2500 cal. BP dans les trois sites d'études. (IPA : indice pollinique d'anthropisation, MPC : taux d'accumulation des macro-particules carbonisées)

À WAL, l'enregistrement débute dans une phase de forêt humide mais la zone humide est plus restreinte que dans les deux autres sites comme le montrent les pourcentages plus faibles des pollens d'aulne. Le bouleau domine légèrement l'assemblage pollinique et le saule, la bourdaine ainsi que *Lysimachia* sont présents, même si ce dernier reste cependant sporadique. Les sphaignes et les Cyperaceae constituent les strates herbacées et muscinales. Ainsi, à cette époque au point de prélèvement à WAL, la végétation semble être une aulnaie-boulaie à sphaignes.

À partir de 4180 cal. BP, à WAL, le niveau d'eau augmente autour du point de prélèvement comme l'indique l'apparition des pollens de *Filipendula*, *Lythrum* et *Typha/Sparganium* qui attestent de la mise en place d'une mégaphorbiaie plutôt mésotrophe, probablement au bord d'un cours d'eau. La chute du taux de fraction minérale dans le sédiment indique une accumulation de matière organique à partir de cette époque. À partir de cette date, les pourcentages des pollens d'aulne diminuent également, accompagnés de ceux du saule, de la bourdaine et de *Lysimachia* alors que ceux du bouleau se développent légèrement.

L'aulne connaît également une première phase de régression entre 4000 et 3450 cal. BP à HOR et entre 3630 et 3250 cal. BP à KOH (Figure IV.4-2, 3) lors de laquelle il atteint un premier minimum, permettant le développement du bouleau qui atteint ses valeurs maximales dans les deux sites, alors que le taux de fraction minérale dans le sédiment atteint ses valeurs les plus basses dans les deux séquences. À HOR, la régression de l'aulne est également contemporaine de la période comprise entre 4050 et 3010 cal. BP, pendant laquelle les concentrations polliniques et des MNP augmentent, tout comme le taux d'accumulation calculé par le modèle âge-profondeur (en cm.an^{-1}) (Figure IV.4-3). De plus, cette période d'augmentation du taux d'accumulation des sédiments est encadrée par deux pics du taux d'accumulation des macro-particules carbonisées.

Deux scénarios peuvent être proposés pour expliquer ces observations : l'un d'origine climatique, l'autre d'origine anthropique. Dans le premier scénario, ces différents indices pourraient indiquer une modification du régime hydrique des trois sites suite à un changement climatique. Dans les séquences de HOR et WAL, la chute de l'aulne est également contemporaine du développement du hêtre (cf. IV.1) que l'on attribue à la fin de l'Optimum Climatique de l'Holocène, au début de la Néoglaciation et/ou à l'évènement climatique de 4200 cal. BP. Ce dernier voit le déclin général des températures et peut entraîner localement

une augmentation de l'humidité, comme cela semble être le cas dans le Pays de Bitche (BRADLEY & BAKKE, 2019 ; GEIRSDOTTIR *et al.*, 2019).

De plus, une augmentation des précipitations est également enregistrée dans plusieurs régions voisines (Allemagne, Suisse, Jura), engendrant une augmentation des niveaux des lacs lors de phases datées entre 4500 et 3200 cal. BP (VOIGT *et al.*, 2008). Ainsi, des températures plus froides, des précipitations ou une humidité atmosphérique plus importantes ont pu modifier le bilan hydrique des zones humides du Pays de Bitche, générer des conditions plus anoxiques et/ou diminuer l'activité microbienne. Ces nouvelles conditions ont alors pu engendrer une diminution de la décomposition de la matière organique, comme l'indique l'augmentation du taux de matière organique dans le sédiment des trois sites. À HOR, la présence des spores de *Mougeotia* (HdV 61) et *Zygnema* (HdV 62), algues vertes d'eaux douces, indique bien un milieu très humide (Figure IV.4-3).

De plus, comme à WAL, où des taxons de la mégaphorbiaie sont identifiés à cette période, à HOR et à KOH, les présences respectives de pollens de *Nymphaea* et de *Nuphar* montrent bien que le niveau d'eau augmente, noyant probablement l'aulne qui régresse alors localement dans les zones inondées. Dans ces deux sites, cette augmentation du niveau d'eau peut être le résultat de l'élargissement du cours d'eau dans le fond plat des vallons.

Dans les sites de HOR et WAL, des carporestes de *Juncus* sp. sont identifiés avant (WAL) et pendant (HOR) cette période. Une identification plus poussée des carporestes de *Juncus* sp. observés dans ces niveaux a montré qu'il pouvait s'agir soit de *J. articulatus* ou de *J. acutiflorus*, les deux espèces produisant des graines très difficiles à différencier visuellement. Ces deux espèces sont cependant caractéristiques de milieux détrempés, riches en matière organique, méso-oligotrophes et acides (LAUBER *et al.*, 2018 ; MANNEVILLE *et al.*, 2006). Leur développement indique donc également une augmentation du niveau d'eau et/ou la mise en place de conditions plus acides au point de prélèvement, qui ont dû engendrer une diminution des processus de dégradation des restes végétaux et peuvent expliquer l'augmentation de la teneur en matière organique perçue par la perte au feu.

Les mêmes observations peuvent être faites à WAL où le taux de matière minérale dans le sédiment diminue déjà progressivement, à partir de 5110 cal. BP, de manière synchrone avec l'augmentation du nombre de restes de *Juncus* sp. (Figure IV.4-2, C).

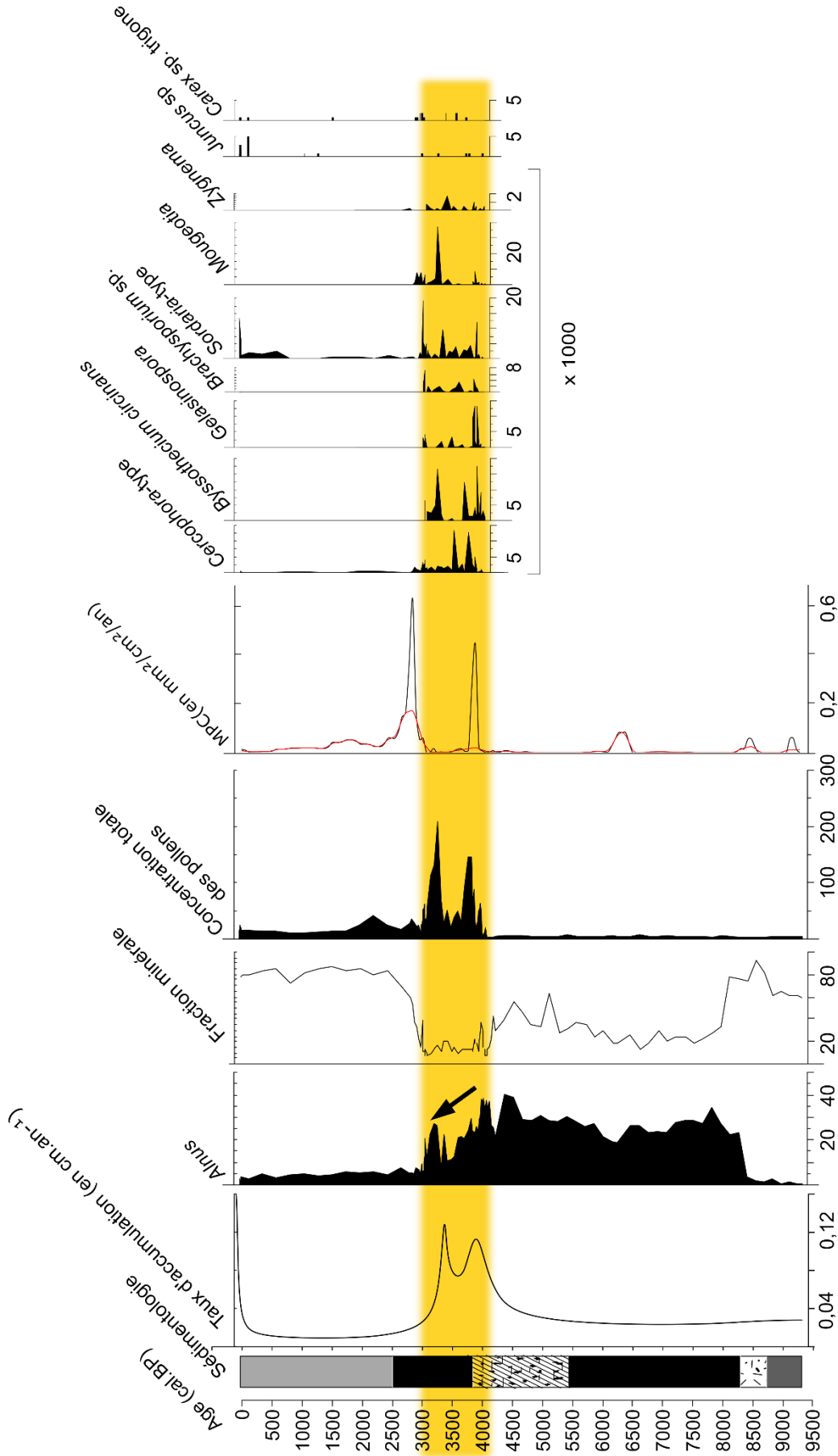


Figure IV.4-3 : Détail des indices « marqueurs » de la zone de 4000-3000 cal. BP dans la séquence de HOR (les comptages de *Juncus* sp. et *Carex* sp. trigone sont exprimés en nombre de restes, les concentrations des pollens et des MNP sont en nb/gramme de sédiment, MPC : macro-particules carbonisées)

Ainsi, dans les trois sites, la fin de l'Optimum Climatique de l'Holocène a entraîné une augmentation du niveau d'eau qui a engendré une accumulation de matière organique et une diminution du pH. L'acidification du milieu a pu également entraîner une diminution de l'état trophique. Ces nouvelles conditions édaphiques ont alors favorisé le développement du bouleau, au détriment de l'aulne qui supporte moins bien que le bouleau pubescent les sols inondés en permanence et trop acides (BENSETTITI *et al.*, 2002 ; MANNEVILLE *et al.*, 2006 ; RAMEAU *et al.*, 1989). Dans le site de HOR, ces conditions auraient alors engendré une meilleure conservation des microfossiles. En revanche, dans le site de WAL, bien que les conditions climatiques aient également engendré une augmentation du niveau d'eau, ce dernier est bien moins élevé que dans les deux autres sites et ne justifie pas la diminution des pourcentages des pollens d'aulne.

Le second scénario pouvant expliquer la chute de l'aulne dans les sites, ainsi que l'augmentation du taux d'accumulation des sédiments (en $\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$) dans le site de HOR pourrait être un impact anthropique sur la tourbière. En effet, le déboisement de la tourbière, pouvant être perçu au travers de la diminution des pourcentages d'aulne et la présence d'indices d'incendie locaux (pics du taux d'accumulation des macro-particules carbonisées) dans les trois sites ont pu induire une accumulation de bois mort, et donc de matière organique en décomposition dans la tourbière. Dans les sites de HOR et KOH, la présence contemporaine de spores de champignons saprophytes et/ou carbonicoles comme *Cercophora*-type (HdV 112), *Bysothecium circinans* (HdV 16), cf. *Brachysporium* (HdV 360), *Gelasinospora* (HdV 1-2) ou *Coniochaeta lignaria* (HdV 172) témoignent en effet de la présence locale de bois ou de matière organique en décomposition (Figure IV.4-3). En plus d'engendrer une accumulation de matière organique, le déboisement de la tourbière a eu pour conséquence la réduction de l'« effet écran » de l'aulne et a ainsi permis le dépôt d'une plus grande quantité de pollen, expliquant alors l'augmentation de leurs concentrations dans le site de HOR. Le bouleau, essence pionnière, se serait alors développé, indiquant ici une perturbation de la dynamique naturelle. Le déboisement de la tourbière peut être expliqué par la mise en pâture de celle-ci, comme en atteste la présence de spores de champignons coprophiles dans la tourbe à cette époque (HdV 112, HdV 55) dans la séquence de HOR. Dans le site de WAL, la chute de l'aulne est contemporaine de l'apparition des céréales et de certains IPA (Anthemideae, Cichorioideae,

Plantago lanceolata), indiquant également l'origine anthropique du déboisement de l'aulnaie, liée à la mise en place des pratiques agro-pastorales (Figure IV.4-2, C).

L'aulne se redéveloppe ensuite brièvement dans les séquences de HOR et KOH, alors que le bouleau régresse à nouveau, laissant à penser que la tourbière n'est plus exploitée, comme semble l'indiquer la diminution des concentrations de spores de champignons coprophiles (HdV 55, HdV 112) dans les deux sites.

Les deux scénarios proposés ici de manière déconnectée ont également pu se dérouler de manière synchrone, concourant ensemble à la modification de la végétation locale des tourbières. L'impact anthropique possible proposé sur les tourbières marquerait alors le début de l'influence humaine qui conditionne la suite des dynamiques de la végétation locale et qui sera discuté dans le prochain chapitre.

Chapitre V.

Impacts des activités humaines sur les écosystèmes



E.Gouriveau

La ville de Bitche depuis la Citadelle

V.1. Identification et impact des activités humaines

V.1.1. Les pratiques culturelles

La mise en place de cultures à proximité des sites peut être directement suivie dans les diagrammes polliniques par l'apparition des pollens de céréales et des taxons polliniques indicateurs d'anthropisation, notamment les plantes messicoles. De plus, la mise en place de l'écosystème cultivé et des différents systèmes de culture engendre également de nombreuses perturbations et modifications de la végétation et des sols qui peuvent être mises en évidence grâce aux différents indicateurs étudiés (Figure V.1-1).

V.1.1.1. Les premiers indices polliniques de la culture des céréales

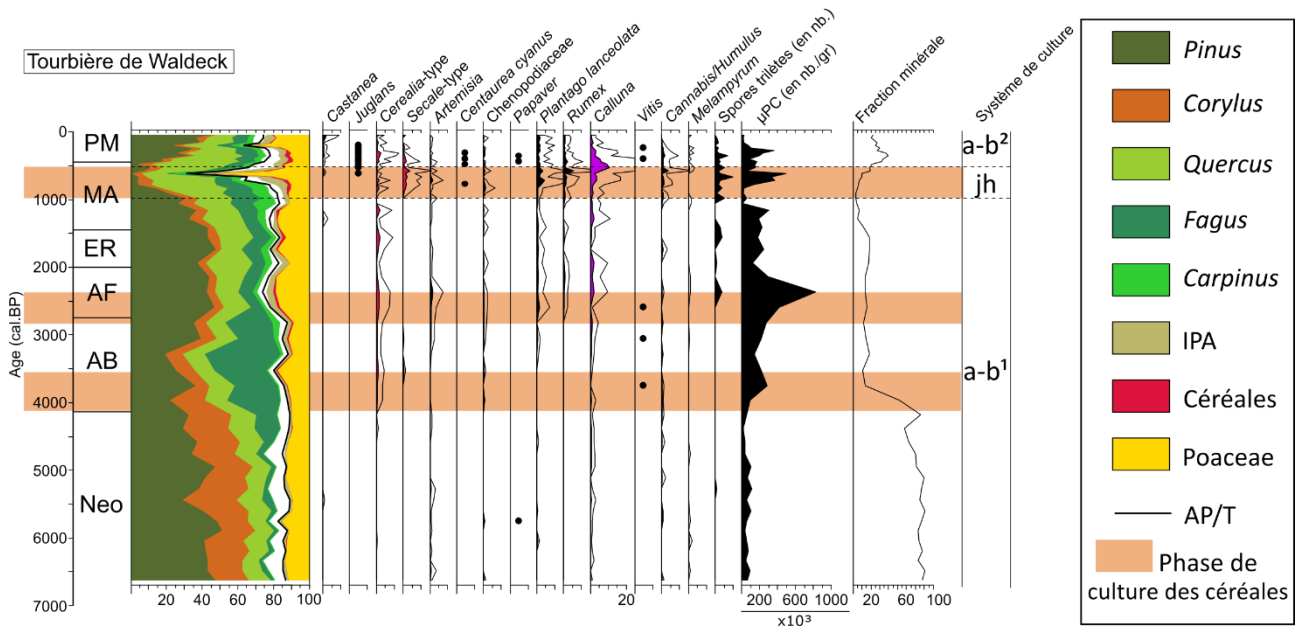
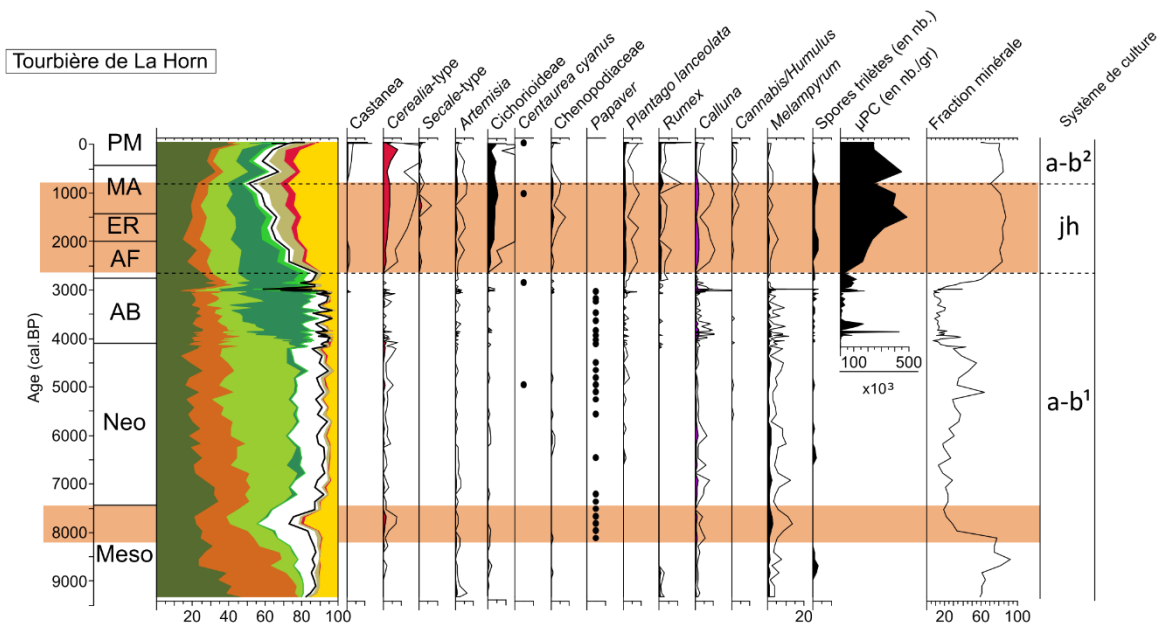
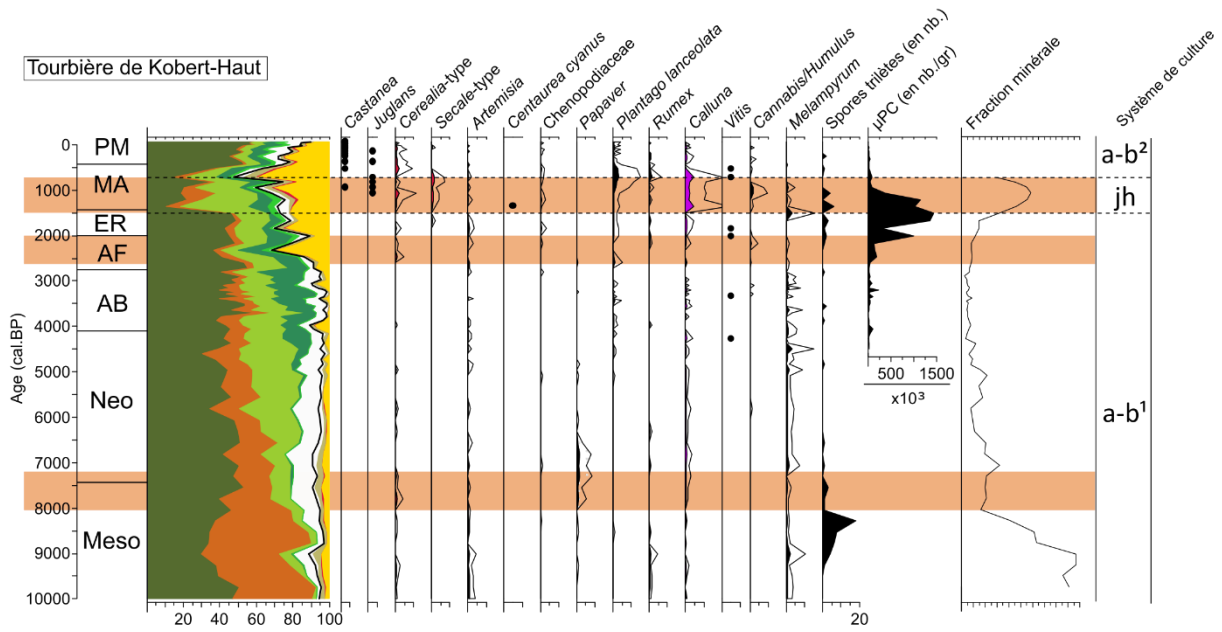
Les premiers grains de pollen de *Cerealia*-type sont identifiés dans les séquences de KOH et de HOR (Figure V.1-1) au Mésolithique (11550-7450 cal. BP ; 9600-5500 cal. BC).

Dans la séquence de KOH, des pollens isolés de *Cerealia*-type sont identifiés depuis le bas de la séquence (200 cm), que le modèle âge-profondeur date entre 9910-10100 cal. BP (8100-7960 cal. BC). Une datation radiocarbone réalisée sur des restes végétaux à 194 cm donne un âge radiocarbone mesuré de 8750 ± 30 BP (95.4%), soit après calibration, un âge entre 9900 et 9600 cal. BP (7940-7650 cal. BC), indiquant l'origine mésolithique de ces niveaux.

Dans la séquence de HOR, des pollens de *Cerealia*-type sont identifiés à partir de 270 cm. Une datation radiocarbone a été réalisée à 254 cm, sur des charbons de bois, et donne un âge radiocarbone mesuré de 7450 ± 50 BP, soit après calibration 8370-8180 cal. BP (6420-6230 cal. BC), indiquant, là encore, l'origine mésolithique des niveaux.

L'interprétation de ces pollens peu nombreux est rendue délicate par l'incertitude dans l'identification du type *Cerealia* (BEHRE, 2007). L'identification repose ici uniquement sur des critères de tailles : diamètre du grain supérieur à 40 μm et annulus supérieur à 10 μm .

Figure V.1-1 : (page suivante) Diagramme simplifié des résultats en lien avec les activités agricoles dans les séquences de HOR, KOH et WAL. (AP/T : ratio arboreal pollens/total, μPC : micro-particules carbonisées, IPA : indices polliniques d'anthropisation, a-b : Culture sur abattis-brûlis, jh : Jachère herbacée, PM : Période moderne, MA : Moyen Âge, ER : Epoque romaine, AF : âge du Fer, AB : âge du Bronze, Neo : Néolithique, Meso : Mésolithique, nb/gr : nombre de microfossiles ou des μPC par gramme de sédiment) (Dans le bloc diagramme, le blanc correspond aux autres taxons, arborés ou herbacés.)



Comme nous l'avons déjà abordé (cf. p. 107), certaines Poaceae « sauvages » produisent un grain de pollen pouvant atteindre des diamètres comparables à ceux des céréales (BEHRE, 2007 ; JOLY *et al.*, 2007). C'est le cas par exemple de *Glyceria fluitans*, plantes inféodées aux milieux humides (marais, fossés, rivières). Or, ce taxon peut tout à fait être présent dans nos milieux de prélèvement, d'autant plus au bas des deux séquences, pour lesquelles l'étude de la végétation locale indiquent localement un milieu marécageux.

Cependant, on peut noter que dans les deux séquences, respectivement à partir de 8120 cal. BP (i.e 6170 cal. BC) à HOR et de 9500 cal. BP (i.e 7550 cal. BC) à KOH, la présence de grains de pollen de *Cerealia*-type est contemporaine de l'apparition de *Papaver*, taxon archéophyte messicole, jusqu'alors absent des comptages (BRUN, 2007).

De plus, à partir de 8120 cal. BP (i.e 6170 cal. BC) à HOR et de 8530 cal. BP (6580 cal. BC) à KOH, la couverture forestière s'ouvre de manière importante autour de HOR (de 84 à 73%) et de manière plus modérée autour de KOH (de 94,6 à 90%). Les pourcentages de pollens de *Cerealia*-type atteignent alors jusqu'à 1,5% (4 grains de pollens de taille supérieure à 40 µm dont 2 de taille supérieure à 44 µm avec une taille d'annulus supérieur à 10 µm), autour de 7670 cal. BP dans la tourbière de HOR.

Ces indices (*Cerealia*-type, *Papaver*, ouverture) semblent indiquer un premier impact humain sur l'écosystème forestier autour de 6600-6200 cal. BC, en lien avec la présence restreinte et très locale de possibles céréales et *Papaver*.

L'hypothèse, proposée par BEHRE (2007), d'un apport lointain depuis des régions où l'agriculture se serait propagée plus tôt (Europe du Sud-Est, Proche Orient) est peu probable pour nos sites. D'une part, les pourcentages des pollens d'arbres témoignent d'un environnement extrêmement boisé, rendant difficile l'apport lointain de pollen dans les petites tourbières localisées au fond de cuvettes densément boisées. D'autre part, aucun autre pollen de plantes originaires de ces régions (telles que *Pistacia*, *Olea*,...) ne semble indiquer un apport lointain (TINNER *et al.*, 2007).

Cependant, en l'absence d'une identification plus poussée, par exemple par l'observation de ces grains de pollen au microscope à contraste de phase (BEHRE, 2007 ; BEUG, 2004), il est délicat de proposer une interprétation concernant ces indices (pollens de *Cerealia*-type, *Papaver*, ouvertures) qui précèdent de 700 ans (HOR), voir de plus d'un siècle (KOH), l'arrivée des colons danubiens de la culture Rubanée, considérés comme les porteurs de l'agriculture

en Europe et notamment dans l'est de la France aux alentours de 5500-5000 cal. BC (BLOUET & LANSIVAL, 1993). En revanche, ces indices polliniques sont cohérents avec d'autres indices découverts dans de nombreuses régions d'Europe et seront discutés par la suite (cf. VI.2.1).

En dehors de ces indices de la fin du Mésolithique, les indices d'anthropisation et d'agriculture restent très limités tout au long du Néolithique. À WAL et KOH, les céréales sont extrêmement rares au cours de toute cette période et les pourcentages de pollens d'arbres se maintiennent à leur valeur d'origine (Figure V.1-1). En revanche, autour du site de HOR, les céréales et les autres IPA, dont *Plantago lanceolata*, qui apparaît à cette époque, sont plutôt bien enregistrés (Figure V.1-1). L'espace boisé subit également des ouvertures mais celles-ci sont brèves, de faible intensité et les pourcentages des pollens d'arbres retrouvent leur valeur d'origine après chaque recul.

V.1.1.2. Intensification des cultures et premiers impacts : de l'âge des Métaux à l'époque romaine

À partir de l'âge des Métaux, les trois sites enregistrent une intensification des activités agricoles et les premiers impacts significatifs sur les paysages du Pays de Bitche. Ainsi, dès le début de l'âge du Bronze (4100 cal. BP) autour de Waldeck, la culture des céréales, jusqu'alors inexistante, se développe (Figure V.1-1). La présence de plantes nitrophiles et rudérales (*Artemisia*, Chenopodiaceae) atteste également de la présence d'occupations humaines et de cultures. L'apparition des pollens de céréales est contemporaine d'une légère ouverture du milieu forestier qui impacte principalement le pin et le noisetier. Parallèlement, les micro-particules carbonisées se font également plus nombreuses, attestant de l'utilisation du feu dans le bassin versant. L'installation des cultures a donc nécessité le déboisement des pentes du bassin versant et du fond de vallon, nettoyés par le feu.

À la transition de l'âge du Bronze à l'âge du Fer, entre 2800 et 2600 cal. BP, les cultures de céréales s'intensifient à nouveau autour du site de WAL (Figure V.1-1). Le paysage s'ouvre, essentiellement au détriment du hêtre. Le couvert forestier autour de la tourbière recule alors jusqu'à une valeur jamais atteinte (76%), alors que les micro-particules carbonisées montrent une utilisation croissante du feu. Cette ouverture du paysage et les pratiques agricoles engendrent un léger phénomène d'érosion des sols qui entraîne un faible enrichissement en fraction minérale de la tourbe.

C'est également au cours de l'âge du Fer que l'intensification des cultures de céréales entraîne des conséquences sans précédent dans la séquence de HOR (Figure V.1-1). La courbe pollinique des céréales devient continue à partir de 2650 cal. BP et les pourcentages des Cichorioideae suivent exactement la même tendance, indiquant qu'il s'agit en partie de plantes adventices, liées aux cultures (*Anthemis*, *Crepis*, *Arnoseris minima*...). À partir de la même date, les arbres reculent durablement (essentiellement le hêtre et le pin) alors que les micro-particules carbonisées augmentent. Les pentes du bassin versant sont alors à nu et/ou perturbées par les activités humaines. Cela génère des phénomènes d'érosion qui, comme le montrent les fortes valeurs de la fraction minérale dans le sédiment ainsi que l'augmentation des valeurs de susceptibilité magnétique, provoque un apport important de matière détritique.

Autour du site de KOH, les indices d'agriculture s'intensifient également à l'âge du Fer, notamment avec l'augmentation des pourcentages des pollens des céréales, à partir de 2470 cal. BP, qui restent malgré tout peu représentés (Figure V.1-1). Les pratiques agricoles engendrent également une accélération et une amplification de l'ouverture du couvert forestier dans le bassin versant et les micro-particules carbonisées indiquent l'utilisation croissante du feu. Ici aussi, ces activités fragilisent les sols du bassin versant et provoquent leur érosion et l'apport de matériel détritique dans la tourbière.

L'ensemble de ces résultats montrent qu'autour des sites étudiés, l'âge des Métaux, et principalement l'âge du Fer, enregistre les premiers impacts significatifs des activités de subsistance sur le paysage. De manière générale, la culture des céréales nécessite des surfaces déboisées, engendrant le recul de la forêt, essentiellement du hêtre qui s'était largement propagé dans le Pays de Bitche depuis la fin du Néolithique. Ce déboisement, auquel s'ajoute le travail du sol, engendre localement une déstabilisation des sols sableux. Ceux-ci ne sont en effet plus maintenus par le système racinaire superficiel dense des hêtres, ce qui génère des phénomènes d'érosion. Ces impacts sont ensuite toujours enregistrés au cours de l'époque romaine avec une intensité comparable.

Au côté des céréales, des pollens de vigne sont identifiés dans les séquences de KOH et WAL dans des niveaux datés de l'âge du Bronze et de l'âge du Fer. Il s'agit certainement de pollens de vigne sauvage (*Vitis vinifera* subsp. *sylvestris*) puisque l'introduction de la vigne cultivée n'est attribuée qu'aux Romains et que sa culture n'est attestée dans les régions du Rhin et de la Moselle qu'à partir des III^{ème} et IV^{ème} siècles après J.-C. (SCHNITZLER, 2011). La

vigne sauvage est actuellement rare en Europe où son aire de répartition est en régression (ANDRE *et al.*, 2017 ; ARNOLD, 2002 ; LACOMBE, 2012 ; SCHNITZLER-LENOBLE *et al.*, 2018). Elle se limite actuellement aux forêts alluviales et aux forêts colluviales où elle trouve les sols frais et humides optimaux pour son développement et empêchant la propagation du phylloxéra. Cependant, les données écologiques disponibles pour les périodes précédant la crise du phylloxéra indiquent qu'elle possédait une amplitude écologique plus large (ANDRE *et al.*, 2017). La vigne produit un pollen qui est transporté soit par des insectes pollinisateurs, soit par le vent sur de courtes distances, ce qui tend à conférer une origine locale aux pollens de vigne identifiés dans nos séquences (ANDRE *et al.*, 2017 ; TURNER & BROWN, 2004). De plus, bien que des pollens de vigne sauvage aient été enregistrés dans la vallée du Rhin depuis l'âge du Bronze (SCHNITZLER, 2011), un apport lointain est très peu probable car à cette époque, le paysage autour des sites de KOH et WAL est encore largement dominé par les forêts. Ces observations confirment donc une présence locale de la vigne sauvage, probablement dans les forêts alluviales des fonds de vallée. Deux autres pollens de vigne ont été identifiés, dans la séquence de KOH, à la transition âge du Fer/époque romaine mais il est difficile de savoir s'il s'agit ici de vigne sauvage ou de vigne cultivée.

V.1.1.3. Diversification des cultures et impact grandissant à partir du Moyen Âge

Autour des trois sites étudiés, le Moyen Âge est caractérisé par une intensification des pratiques culturelles (Figure V.1-1). Les cultures de céréales sont alors permanentes dans les vallées autour des sites, comme l'indiquent les courbes polliniques continues du *Cerealia*-type, et s'intensifie au cours de la période médiévale. De nombreuses plantes messicoles accompagnent alors les cultures : *Centaurea cyanus*, *Papaver* ainsi que *Rumex*, considéré comme une adventice des céréales d'hiver sur les sols sableux (BEHRE, 1981 ; BRUN, 2007 ; COURT-PICON, 2007 ; MIRAS, 2004).

Cette époque montre également une diversification des céréales cultivées. En effet, le Moyen Âge est toujours marqué dans nos séquences par l'apparition ou le développement du seigle (*Secale*-type) alors que les autres céréales (*Cerealia*-type) n'évoluent pas ou régressent légèrement. À HOR en revanche, seul le début du Moyen Âge est marqué par une courte phase de présence du seigle. La comparaison entre les courbes polliniques de *Secale*-type et de

Cerealia-type doit cependant être interprétée avec prudence car le seigle est une céréale anémogame, produisant de nombreux pollens qui possèdent une très bonne capacité de dispersion, ce qui engendre une sur-représentation de ce taxon dans les diagrammes polliniques (GRESSER & RICHARD, 1986 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015).

Le seigle est une céréale rustique qui s'accommode bien des sols sableux, filtrants, pauvres et acides, et qui résiste au froid et à la sécheresse (BONNAIRE & WIETHOLD, 2010 ; SCHILPEROORD, 2017 ; SIGAUT, 1995). Sa culture est donc bien adaptée à la nature des sols autour de nos sites, notamment à l'est du pays couvert. En revanche, autour de HOR, où les sols semblent être légèrement plus riches, d'autres céréales sont cultivées (*Cerealia*-type) et le seigle reste rare.

De manière générale, le développement agricole médiéval provoque une importante ouverture de la couverture forestière et la régression des principales essences : le pin et le hêtre autour de WAL, le hêtre et le chêne autour de HOR et le chêne et le pin autour de KOH (Figure V.1-1). Ainsi, l'ouverture maximale autour des sites est atteinte à l'époque médiévale, respectivement au XII^{ème}, XIII^{ème} et XIV^{ème} siècle pour HOR, KOH et WAL. Dans les bassins versants des tourbières de HOR et KOH, le Haut Moyen Âge est également marqué par des phénomènes d'érosion conséquents, comme le montrent l'important apport détritique dans les tourbières, l'augmentation des valeurs de la susceptibilité magnétique ainsi que les hautes teneurs en silicium enregistrées à HOR. Comme à l'âge du Fer, l'ouverture du paysage et le travail du sol sur les parcelles agricoles perturbent et mettent les sols à nu, entraînant ainsi leur érosion.

Outre les céréales, le Moyen Âge voit également l'apparition des arbres « cultivés » tels que le châtaignier et le noyer. Autour de KOH et WAL, ces essences qui étaient absentes aux périodes antérieures se développent mais restent cependant rares (Figure V.1-1). Bien que les caractéristiques des sols de la région, frais et acides, soient optimales pour le développement du châtaignier, ses faibles pourcentages polliniques semblent indiquer qu'il n'est donc pas cultivé et les rares pollens identifiés correspondent sûrement à quelques spécimens isolés s'étant propagés à la faveur des ouvertures du couvert forestier dense de la région, depuis les zones où ils sont cultivés (RAMEAU *et al.*, 1989). En revanche, les sols des Vosges du Nord ne sont pas favorables au noyer qui préfère les sols riches et plutôt neutres. Les pollens de noyer identifiés dans nos séquences sont alors certainement issus d'apports extra-régionaux, depuis des régions aux conditions favorables à son développement (RAMEAU *et al.*, 1989).

Les grandes ouvertures du Moyen Âge sont accompagnées du développement du taxon pollinique *Cannabis/Humulus* vers 1490 cal. BP à HOR, 1207 cal. BP à KOH et vers 1060 cal. BP à WAL (Figure V.1-1). Le houblon est rare dans notre région d'étude car il nécessite des sols humides, basiques à légèrement acides et riches. Il ne s'observe donc que dans quelques aulnaies marécageuses riches, ce qui laisse à penser que les pollens identifiés sont plutôt attribuables au genre *Cannabis* (RAMEAU *et al.*, 1989). De plus, certains pollens identifiés en tant que *Cannabis/Humulus* présentent une taille supérieure à 28 µm qui permet de distinguer les pollens du genre *Cannabis* (MERCURI *et al.*, 2002). Bien que dans nos sites les pourcentages polliniques de *Cannabis/Humulus* restent très bas (toujours inférieurs à 3,5%), leur augmentation au Haut Moyen Âge est cohérente avec l'intensification des activités culturelles autour des sites et avec les connaissances historiques. En effet, la culture du chanvre en Alsace a pris de l'importance sous l'impulsion romaine avant d'être largement développée sous Charlemagne qui en ordonna la plantation (KAPP & SCHAEFFER, 1965). De même, la culture du chanvre pour l'industrie textile est attestée au Haut Moyen Âge sur le Plateau Lorrain, où les mardelles ont servi de zone de rouissage, ainsi que dans les Hautes Vosges gréseuses (tourbière du Rond Pertuis supérieur), où la présence de *Cannabis/Humulus* au Bas Moyen Âge atteste du développement de l'industrie textile qui était commune dans les Vosges (ETIENNE *et al.*, 2013, 2011 ; RUFFALDI *et al.*, 2007 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015). Les pollens de *Cannabis/Humulus*, identifiés dans nos séquences, correspondent donc certainement à des cultures de chanvre qui restent cependant restreintes ou éloignées de nos sites.

De très rares pollens de vigne ont été identifiés au Moyen Âge à KOH et à l'époque moderne à WAL et sont probablement issus de vigne cultivée. En effet, les pollens de la séquence de KOH sont identifiés dans des niveaux datés aux alentours de 720 et 530 cal. BP (soit 1230 et 1420 cal. AD), et sont contemporains de l'époque de l'abbaye de Sturzelbronn. Les moines cisterciens de l'abbaye ont alors pu planter des vignes sur leur domaine. Malheureusement, les archives concernant l'abbaye de Sturzelbronn sont presque inexistantes et ne peuvent confirmer cette hypothèse (JEHIN, 2010). Cependant, au Moyen Âge, l'implantation des abbayes et des communautés religieuses s'accompagne presque toujours de la création d'un vignoble et au XI^{ème} siècle, les moines plantent des vignes dans de très nombreuses régions, même là où le sol n'est que peu propice à sa culture (INRAP, 2016). Ainsi, dans les vallées du Rhin et de la Moselle, la culture de la vigne est entreprise en partie par les couvents et les monastères qui

la font prospérer au cours du Moyen Âge (KAMMERER, 2012 ; SCHNITZLER, 2011). Dans les Vosges du Nord, l'abbaye de Wissembourg (22 km de WAL et 30 km de KOH), fondée au VII^{ème} siècle, possède un vignoble, que la communauté religieuse a installé dans les défrichements (JEHIN, 2010). De plus, l'identification de pollens de vigne à WAL à l'époque moderne est également cohérente avec la présence attestée de vignobles sur le piémont alsacien des Vosges du Nord, au XVIII^{ème} siècle (JEHIN, 2006a ; KAMMERER, 2012).

V.1.1.4. Évolution des systèmes agraires

Les indices de culture des céréales enregistrés au cours du temps et l'évolution du paysage forestier nous permettent de proposer une reconstitution des pratiques agricoles utilisées dans le Pays de Bitche et leurs impacts du Néolithique à nos jours. Bien que la chronologie de cette évolution varie quelque peu d'un site à l'autre, la succession des pratiques est similaire dans les trois sites.

V.1.1.4.1. Un système agro-forestier itinérant sur abattis-brûlis

Au Néolithique, autour du site de HOR (Figure V.1-1, a-b¹), l'aspect non continu des courbes polliniques des taxons *Cerealia*-type et *Papaver* indique une culture temporaire des céréales, qui disparaît régulièrement du bassin versant ou s'éloigne périodiquement du site. Les pourcentages des pollens des taxons arboréens oscillent également, notamment ceux du noisetier qui varient à l'inverse de ceux des céréales, indiquant que cet arbre pionnier se développe sur les terrains agricoles temporairement abandonnés. La présence des pollens de céréales à partir de 8120 cal. BP est accompagnée par une légère augmentation des pourcentages polliniques de la callune. La propagation de ce sous-arbrisseau héliophile, qui supporte très bien les incendies, indique que les zones ouvertes dans le bassin versant sont brûlées puis abandonnées, après une période de culture (MULLER, 1986 ; VON SCHEFFER *et al.*, 2019). De plus, le taxon *Melampyrum*, identifié dans les séquences de HOR et KOH est parfois considéré comme un indicateur de zones brûlées et pousse dans les lisières, les clairières et les forêts claires (CASELDINE & HATTON, 1993 ; RAMEAU *et al.*, 1989).

Ces indices attestent d'un système agro-forestier avec une culture itinérante des céréales sur abattis-brûlis. D'après l'archéologie expérimentale, ce système de culture apparaît comme

la meilleure méthode, sinon la seule, pour cultiver des céréales avec les outils disponibles au Néolithique, dans des milieux boisés au sol non optimal (RÖSCH *et al.*, 2014). Il consiste en un déboisement d'une clairière souvent restreinte, suivi d'un brûlis des végétaux abattus, directement sur la parcelle nouvellement ouverte. Cette pratique permet d'apporter au sol les minéraux nutritifs contenus dans les cendres des végétaux (BEHRE, 1988 ; MAZOYER & ROUDART, 2002).

Dans ces ouvertures restreintes, l'alternance de cultures temporaires de céréales, relativement courtes, et de longues friches forestières explique les faibles oscillations de la courbe des pollens d'arbre. En effet, bien que le déboisement initial de la zone à mettre en culture induise localement le recul des arbres, la période de jachère forestière permet leur retour. Les zones abandonnées sont alors colonisées par des espèces herbacées héliophiles, puis par des arbrisseaux comme la callune, et par des arbres pionniers comme le pin, le noisetier ou encore le bouleau, en fonction du sol.

Autour de la tourbière de HOR, les indices polliniques attestant de ce système de culture persistent jusqu'au début de l'âge du Fer. En revanche, à WAL et KOH (Figure V.1-1, a-b¹), où les indices de culture de céréales sont plus rares au Néolithique, les enregistrements polliniques montrent, au cours de l'âge des Métaux et de la période romaine, une présence discontinue des céréales, des ouvertures temporaires regagnées régulièrement par la forêt, ainsi que l'augmentation des indices de feu à l'échelle du bassin versant. Ces indices polliniques caractéristiques d'une culture itinérante de céréales sur abattis-brûlis indiquent que cette pratique est employée jusqu'au Haut Moyen Âge à KOH et jusqu'au Moyen Âge Central à WAL.

L'utilisation d'une pratique d'abattis-brûlis dans le Pays de Bitche peut être proposée pour ces périodes reculées car elle est également rapportée lors d'inspections dans le Comté de Bitche pour les périodes récentes des XVI^{ème} et XVIII^{ème} siècles (JEHIN, 2005).

V.1.1.4.2. Un système de céréaliculture avec jachères herbacées

Dans les trois sites, le système de culture des céréales évolue à partir de l'âge du Fer à HOR (vers 2650 cal. BP) et du Moyen Âge à KOH et WAL (respectivement autour de 1355 cal. BP et de 900 cal. BP) (Figure V.1-1, jh.). À partir de ces dates, alors que la culture des céréales s'intensifie, les pourcentages des pollens arboréens diminuent progressivement et ne reviennent plus à leur valeur d'origine comme cela était observé aux périodes antérieures. Le

milieu est donc durablement maintenu ouvert. Des feux fréquents sont toujours attestés dans le bassin versant par l'augmentation ou les fortes concentrations des micro-particules carbonisées. L'augmentation des pourcentages des pollens d'herbacées confirment bien l'ouverture du milieu. Les Poaceae dominent la strate herbacée et de nombreux taxons anthropiques se développent comme *Plantago lanceolata*, *Rumex* et les Cichorioideae. Or, selon Behre (1981), *Plantago lanceolata* est un indicateur de la recolonisation des terres cultivées abandonnées, et *Rumex acetosella* apparaît comme une espèce poussant dans les jachères sur les sols sableux acides. De plus, les pourcentages polliniques de la callune augmentent, tout comme le nombre des spores trilètes.

Ces indices polliniques montrent que les longues jachères forestières de la culture itinérante sur abattis-brûlis sont réduites à de courtes jachères, ne permettant plus le retour des arbres mais seulement le développement d'une jachère herbacée. En effet, dans le système agraire à jachère courte, le stade de boisement n'est pas atteint et les jachères sont soit maintenues ouvertes par pâturage, soit défrichées par le feu comme l'atteste dans nos enregistrements la présence des micro-particules carbonisées et de celle de la callune qui supporte bien les incendies et se redéveloppe très rapidement après le passage du feu (MULLER, 1986). Après défrichage, la parcelle peut être mise en culture pour quelques années (2-3 ans d'après les textes du XVIIIème siècle, JEHIN, 2005). De plus, le seigle, qui se développe de manière contemporaine à la mise en place du nouveau système agraire, est une céréale qui se cultive facilement sur les terres issues d'activités d'écobuage¹¹ et d'essartage¹² (SIGAUT, 1995). La pratique de ces préparations du sol tend à en diminuer l'acidité, ce dernier devenant alors plus favorable à la culture du seigle mais toujours peu favorable à celle du blé (SIGAUT, 1995).

Avec ce système, le paysage s'ouvre alors durablement et l'augmentation de *Calluna* indique que des landes à callune se mettent en place dans les déboisements temporairement abandonnés sur les sols acides et pauvres de cette partie du Pays de Bitche. Les landes à callune « naturelles » sont des formations acidiphiles oligotrophes qui ne se développent naturellement que dans des conditions très particulières. Mais la grande majorité de ces landes

¹¹ Préparation d'un espace avant sa mise en culture, consistant à nettoyer le sol de sa végétation gênante, à en racler la couche organique superficielle, puis à brûler sur place l'ensemble de ces résidus pour utiliser les cendres comme fertilisant. (DA LAGE & METAILIE, 2015)

¹² Préparation à des fins agricoles d'un terrain boisé ou broussailleux, par fauche, coupe et brûlage de la végétation en place. (DA LAGE & METAILIE, 2015)

est d'origine anthropique, issue des activités agricoles et/ou pastorales (BEHRE, 1988). Elles se mettent en place dès l'âge du Bronze dans différentes régions d'Europe puis subissent ensuite des périodes d'extensions à l'âge du Fer, à l'époque romaine puis au Moyen Âge (BEHRE, 1988).

De nos jours, des landes à callune du type *Genisto pilosae-Callunetum vulgaris* (Oberd. 1938 *nom. inv. propos.* in Collaud *et al.* 2017), dominées par la callune accompagnée d'un cortège plus ou moins important d'herbacées, sont identifiées dans les Vosges, avec une variante existante sur les sols sablonneux du Pays de Bitche (FERREZ *et al.*, 2017). Dans son étude de la végétation du Pays de Bitche, MULLER (1986) décrivait des landes acidiphiles à Daphnée camélée et Callune vulgaire (*Daphno-Callunetum*, Muller 1986 ; *Daphno cneori - Callunetum vulgaris*, Bœuf 2014) dans le camp militaire de Bitche, où elles sont entretenues par le passage des chars et les incendies fréquents résultant des exercices de tirs. Ces landes sont issues de la surexploitation forestière, des déboisements humains, notamment des chênaies et/ou se propagent comme landes pionnières après un feu ou un compactage (BENSETTITI *et al.*, 2005 ; MULLER, 1986). Dans ce type de formation, les chaméphytes (Callune, Genêt) dominent, accompagnés par la fougère aigle (*Pteridium aquilinum*) dont les spores sont identifiées comme des spores Trilètes et par de nombreuses herbacées, ainsi que par quelques ligneux pionniers (pin, bouleau, chêne) (BENSETTITI *et al.*, 2005). Les taxons qui composent ces landes sont, pour leur grande majorité, présents dans nos enregistrements. On peut donc imaginer que les pratiques culturelles adoptées à partir de l'âge du Fer (HOR) ou du Moyen Âge (KOH et WAL), ont pu conduire à la mise en place de ce type de formation végétale. Cependant, une résolution plus fine de l'identification des types polliniques et l'élaboration d'un référentiel pollinique actuel de ces formations sont indispensables pour étayer cette hypothèse.

V.1.1.4.3. Le retour des jachères forestières

À partir du Moyen Âge Central à HOR et KOH et au Bas Moyen Âge à WAL (respectivement vers 800 cal. BP, 720 cal. BP, 530 cal. BP) (Figure V.1-1, a-b²), les pourcentages polliniques de callune déclinent alors que les principaux arbres dominant le paysage avant la période médiévale reviennent à proximité des sites, essentiellement *Pinus*. De plus, *Picea*, dont les pollens étaient jusqu'alors très peu identifiés, se développe de manière importante dans les sites de HOR et KOH. La diminution des pourcentages polliniques des céréales atteste d'une réduction de l'intensité des activités culturelles essentiellement autour des sites de WAL et KOH.

Cependant, la persistance des pollens de céréales indique que les cultures sont toujours présentes aux alentours des sites et que le retour de la forêt est dû à une modification de l'utilisation du paysage et non à un abandon agricole de la région à la fin du Moyen Âge dans le Pays de Bitche.

La raréfaction de la callune, contemporaine du retour des arbres, peut indiquer soit un raccourcissement de la durée des jachères, voire leur disparition au profit de la mise en place de champs permanents, soit un allongement de la durée des jachères. Le passage à une jachère longue implique le retour d'une jachère forestière, comme observée pour les époques antérieures à l'âge du Fer à HOR et jusqu'au Moyen Âge à KOH et WAL, et donc explique l'important retour des arbres. Les landes à callune ne sont alors plus maintenues ouvertes et les arbres colonisent les anciennes friches, avec une reprise de la dynamique naturelle aboutissant, à terme, à un boisement spontané de chênes et/ou de pins sylvestres (BENSETTITI *et al.*, 2005). Dans nos enregistrements, le pin et l'épicéa jouent le rôle de pionniers dans la reconquête des terres et des jachères abandonnées (MULLER, 1986 ; REILLE, 2015). De plus, la diminution des micro-particules carbonisées indique bien que le feu est moins souvent utilisé pour rouvrir les friches. La raréfaction des taxons marqueurs de jachères comme *Plantago lanceolata*, *Rumex* et *Artemisia*, qui est identifié comme marqueur des stades de friches avancées en Franche-Comté (BRUN, 2007), montre également que les jachères sont vite recolonisées par les arbres ce qui ne permet plus le maintien de ces herbacées héliophiles.

De plus, à cette époque, le seigle se raréfie, voire est complètement abandonné, et remplacé par d'autres céréales (*Cerealia*-type). La présence de cultures de céréales importantes, autres que le seigle, sur les sols pauvres et acides de la région de Bitche indique, soit la culture d'une nouvelle céréale adaptée aux sols pauvres, soit la mise en place d'un système d'amendement des champs par la fumure, innovation datant du Moyen Âge Central en Europe (HIEGEL, 2006 ; MAZOYER & ROUDART, 2002).

L'étude des archives du Pays de Bitche au XVIIIème siècle confirme l'hypothèse de la culture d'une céréale rustique autre que le seigle. En effet, à cette époque, l'épeautre est la principale céréale cultivée dans le pays couvert car elle s'accommode des sols pauvres de la région (HIEGEL, 2006). De plus, la réduction de l'intensité des activités agricoles perçue dans nos séquences est cohérente avec les petites exploitations agricoles du Pays de Bitche qui restent, à cette époque, dispersées dans le paysage et peu développées sur les sols pauvres par

manque d'apport d'engrais (HIEGEL, 2006). Les archives confirment également l'hypothèse d'un retour à des jachères longues, se rapprochant du système de culture itinérante sur abattis-brûlis. En effet, des témoignages d'un essartage et d'une « agriculture itinérante sur brûlis » existent dans le Pays de Bitche au XVIème siècle et jusqu'au début du XVIIIème siècle (JEHIN, 2005, p. 103 ; ROCHEL, 2004). En 1580 par exemple, des inspecteurs en visite dans le Comté notent que des terrains sont essartés, cultivés puis abandonnés et cette pratique sera encore mentionnée dans les archives en 1719 (JEHIN, 2005). À cette époque, les terres sont nettoyées par le feu, utilisées temporairement (1-3ans) puis laissées en jachère pendant 10 à 30 ans (JEHIN, 2005 ; ROCHEL, 2004). De plus, les pics de micro-particules carbonisées, observés dans nos séquences, peuvent également être liés aux incendies accidentels, déclenchés par un brûlis mal contrôlé, qui sont assez fréquents et se propagent sur de plus ou moins grandes distances (ROCHEL, 2004).

Ainsi, les systèmes agraires ont évolué au cours des temps, avec un retard observé pour les sites de l'est du pays couvert, et ont engendré des impacts croissants sur le paysage. L'agriculture du Pays de Bitche semble avoir été plus développée et plus intensive au Moyen Âge, comparé aux petites exploitations sur abattis-brûlis connues au XVIIIème siècle. Les systèmes de production agricole ne peuvent en revanche pas être dissociés des pratiques pastorales et y étaient même étroitement liés dans les périodes anciennes. L'analyse multi-proxy menée sur les séquences du Pays de Bitche permet d'ailleurs de mettre en évidence, aux côtés des cultures de céréales, des phases d'élevage et les pratiques qui en dépendent.

V.1.2. Le pastoralisme

Des activités pastorales sont mises en évidence à proximité de nos sites, d'une part par la présence de bétail, et d'autre part, par la mise en place de formations végétales résultant des pratiques liées à l'élevage. La présence de spores de champignons coprophiles dans la tourbe renseigne sur la présence de bétail directement sur la zone humide car les spores ont un caractère très local. Elles sont ici utilisées comme témoin de la présence de bétail aux époques considérées mais l'impact des pratiques pastorales directement sur la zone humide sera abordé dans la partie V.2.

V.1.2.1. Les indices de présence du bétail

Alors que les céréales sont peu cultivées jusqu'au Moyen Âge autour de KOH, les spores de champignons coprophiles y sont présentes depuis le Néolithique (Figure V.1-2). Cependant, leur présence dans la tourbière à cette époque n'est pas confortée par celle de taxons polliniques marqueurs de pression pastorale. Ainsi, si les spores attestent bien de la présence de bétail, l'élevage n'impacte pas, ou très peu, la végétation du bassin versant à cette époque. En revanche, pour la fin du Néolithique et pour l'âge du Bronze, les concentrations de spores de champignons coprophiles atteignent des valeurs plus élevées et plusieurs indices polliniques d'anthropisation apparaissent au cours de trois courtes phases (3970, 3435 et 3040 cal. BP) lors desquelles les premières ouvertures significatives de la forêt sont observées. Dans le bassin versant une végétation herbacée dominée par les Poaceae se met en place. Parmi les IPA qui se développent, *Plantago lanceolata* est considérée comme un marqueur rudéral et de pression pastorale dans de nombreuses études, indiquant la présence de prairies fauchées ou pâturées ou encore de jachères pâturées (BEHRE, 1981 ; COURT-PICON, 2007 ; GALOP *et al.*, 2000 ; MIRAS, 2004). *Artemisia* et les Urticaceae sont des plantes nitrophiles qui se développent dans les zones enrichies en azote par l'agriculture ou la présence de bétail (BEHRE, 1981). Ici, l'absence de céréales indique que la présence de ces taxons est principalement due aux activités pastorales. Dans plusieurs études, *Urtica* est également utilisé comme un indicateur rudéral et de pâturage, tout comme les Anthemideae (BEHRE, 1981 ; BRUN, 2007 ; COURT-PICON, 2007 ; MIRAS, 2004). Tous ces taxons comprennent des espèces qui sont considérées comme des plantes indicatrices de pâturage dans notre région d'étude, d'après une typologie des prairies permanentes des Vosges du Nord et des Vosges mosellanes (BAYEUR *et al.*, 2013). Parmi les Poaceae, on y trouve le pâturin annuel et le ray-grass anglais (indicateur de fertilisation), le chardon et les cirses pour les Anthemideae, l'ortie (Urticaceae) ainsi que le rumex à feuilles obtuses (*Rumex*).

C'est également de l'âge du Bronze que datent les premiers indices de présence de bétail à proximité de la tourbière de HOR (Figure V.1-2). Les concentrations des spores de *Sodaria*-type (HdV 55), *Sporormiella*-type (HdV 113) et *Cercophora*-type (HdV 112) augmentent fortement mais brièvement autour de 3000 cal. BP, mais cette augmentation doit être prise avec précaution car elle correspond à la zone de 4000 cal. BP à 3000 cal. BP pour laquelle l'hypothèse d'une meilleure conservation des microfossiles a été proposée au chapitre IV (cf IV.4).

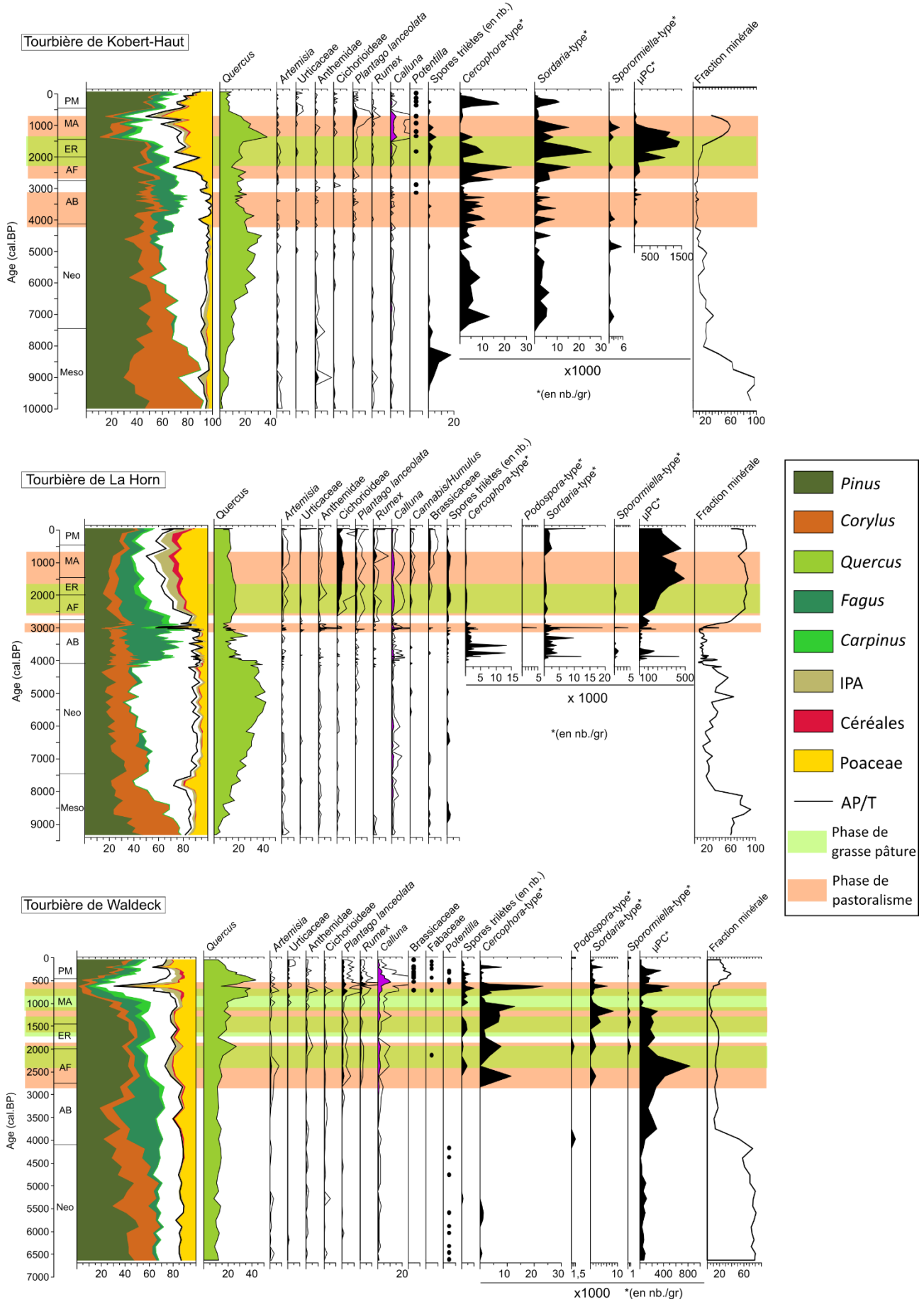
Néanmoins, la présence de bétail est également mise en évidence par les IPA, principalement *Plantago lanceolata* et les Anthemideae, qui atteignent leur premier maximum à cette période. Les Cichorioideae, plantes rudérales, s'ajoutent aux précédents taxons, et indiquent également des milieux piétinés et la présence de pâturages (BAYEUR *et al.*, 2013 ; BEHRE, 1981 ; MIRAS, 2004). Les Cichorioideae sont également considérées comme des indices de forêt pâturée (BEHRE, 1981). Comme à KOH, ces premiers indices d'élevage sont également contemporains d'une première ouverture forestière de forte ampleur mais très brève, accompagnée d'une augmentation des Poaceae et de la callune ainsi que des micro-particules carbonisées. L'ouverture des forêts et les feux, probablement utilisés pour nettoyer les surfaces déboisées, ont exposé le bassin versant de la tourbière à un phénomène d'érosion ayant entraîné l'augmentation des apports détritiques dans la tourbière, soulignés par la perte au feu et l'augmentation des teneurs des marqueurs de détritisme tels que le silicium, l'aluminium, le titane et le rubidium (Figure III.1-9).

À la fin de l'âge du Bronze, autour de 2800 cal. BP, les spores de champignons coprophiles, jusqu'alors quasi-absentes, apparaissent également autour de la tourbière de Waldeck, indiquant que des activités pastorales s'ajoutent à la culture des céréales (Figure V.1-2). *Cercophora*-type (HdV 112) et *Sordaria*-type (HdV 55) sont accompagnés par les mêmes marqueurs de la pression pastorale qu'à KOH et HOR, à savoir : *Artemisia* qui s'intensifie autour de 2800 cal. BP, *Plantago lanceolata* jusqu'alors extrêmement rare, qui atteint 1,4% autour de 2590 cal. BP, ainsi que *Rumex*, qui fait son apparition à la même date. Comme dans les autres sites, le milieu forestier s'ouvre de manière plus importante à cette époque, alors que les Poaceae se développent.

Tous ces indices montrent ainsi la présence de bétail sur les zones humides à partir de l'âge du Bronze mais également dans des ouvertures gagnées sur les forêts du bassin versant, où se développent les IPA.

Figure V.1-2 : (page suivante) Diagramme simplifié des résultats en lien avec les activités pastorales dans les séquences de HOR, KOH et WAL (AP/T : ratio arboreal pollens/total, IPA : indices polliniques d'anthropisation, μ PC : micro-particules carbonisées, PM : Période moderne, MA : Moyen Âge, ER : époque romaine, AF : âge du Fer, AB : âge du Bronze, Neo : Néolithique, Meso : Mésolithique, nb/gr : nombre de microfossiles et de μ PC par gramme de sédiment). (Dans le bloc diagramme, le blanc correspond aux autres taxons, arborés ou herbacés.)

Impacts des activités humaines sur les écosystèmes



À partir de l'âge du Fer à KOH et à WAL, les pratiques pastorales se poursuivent et s'intensifient autour des tourbières comme le montre la présence de plus en plus importante des spores de champignons coprophiles et des taxons marqueurs de pastoralisme (*Plantago lanceolata*, *Rumex*, *Artemisia*, Cichorioideae, Anthemideae). Ces activités pastorales atteignent leur intensité maximale au cours du Moyen Âge dans les deux sites. En revanche, autour du site de HOR, les spores de champignons coprophiles sont réduites à la faible présence de *Sordaria*-type (HdV 55) et à quelques pics des autres types. Cette présence réduite peut être due à une faible pression pastorale à proximité immédiate du lieu de prélèvement, mais on ne peut écarter un problème taphonomique engendrant une faible conservation des spores par rapport à la période précédente. Cependant, les taxons polliniques marqueurs de pastoralisme s'intensifient à partir de l'âge du Fer et indiquent bien la présence de bétail dans le bassin versant, mais à distance de la zone humide.

La présence de bétail et les pratiques liées à son élevage induisent la formation et le maintien de nouveaux habitats écologiques et de nouvelles communautés végétales, essentiellement herbacées et arbustives. Il en résulte également une modification de l'organisation des paysages qui est nettement perçue à partir de l'âge du Fer dans les trois sites.

V.1.2.2. Pratiques pastorales et formations végétales induites par l'élevage

En l'absence de référentiel pollinique concernant les différentes pratiques pastorales et les formations végétales anthropiques dans notre région d'étude, et en l'absence de données complémentaires – archéologiques, archéobotaniques ou zoologiques – il est impossible de reconstituer avec certitude les pratiques pastorales et les formations végétales qu'elles ont induites. Cependant, la comparaison des données polliniques avec les descriptions phytosociologiques des formations végétales liées aux pratiques humaines, actuellement visibles dans les Vosges du Nord, ainsi que l'utilisation des informations sur les pratiques passées, issues des archives historiques, permettent tout de même de proposer une interprétation plus poussée de nos données polliniques en les reliant à des pratiques pastorales précises, ainsi qu'aux formations végétales qui ont pu en résulter.

V.1.2.2.1. Formations herbacées liées au pâturage

Dans nos enregistrements, l'intensification des activités pastorales perçue dans les trois sites à partir de l'âge du Fer est contemporaine de nombreux autres indices.

Aux alentours de la tourbière de HOR, la présence de bétail et l'ouverture de la couverture forestière sont accompagnées par l'augmentation des pourcentages de Poaceae autour de 2650 cal. BP ainsi que de la callune à partir de 2415 cal. BP (Figure V.1-2). Les spores trilètes deviennent également plus fréquentes dans les assemblages polliniques à partir de cette date. Parallèlement, le signal des feux perçu par les micro-particules carbonisées s'intensifie. Parmi les herbacées, les pourcentages de pollens de Brassicaceae jusqu'alors très peu présents augmentent autour de 1950 cal. BP. Ce taxon pollinique contient l'espèce de la capselle bourse à pasteur (*Capsella bursa-pastoris*) qui est un indicateur de prairies pâturées dans les Vosges du Nord et les Vosges mosellanes (BAYEUR *et al.*, 2013).

De même aux alentours de KOH, la réduction de la surface forestière, le développement des Poaceae et l'augmentation de la concentration des micro-particules carbonisées débutent lors de l'augmentation des concentrations de spores de champignons coprophiles, à la transition âge du Bronze/âge du Fer (Figure V.1-2). Puis, autour de 2170 cal. BP, la callune devient plus fréquente et le nombre des spores trilètes augmente. À partir de 1845 cal. BP, les pollens de *Potentilla* deviennent plus fréquents également. Ce taxon pollinique regroupe notamment les potentilles ansérine (*Potentilla anserina*) et rampante (*Potentilla reptans*) considérées dans les Vosges du Nord comme des taxons marqueurs de prairies pâturées (BAYEUR *et al.*, 2013).

Enfin, aux alentours de WAL, le recul des arbres s'amplifie autour de 2800 cal. BP et les Poaceae se développent alors que la callune atteint 2% autour de 2365 cal. BP (Figure V.1-2). Les spores trilètes apparaissent également à partir de cette date et les concentrations des particules carbonisées continuent à augmenter. Plus tard, autour de 720 cal. BP, les pollens de Brassicaceae apparaissent et ceux de Fabaceae, jusqu'alors quasi absent de l'assemblage pollinique, deviennent plus fréquents. Parmi les Fabaceae, le trèfle blanc (*Trifolium repens*) est également un indicateur des prairies pâturées des Vosges du Nord (BAYEUR *et al.*, 2013). Puis le taxon *Potentilla* se développe également autour de 530 cal. BP.

Ces différents indices montrent donc que les activités pastorales entraînent un recul de la forêt ainsi qu'une propagation et une diversification des taxons herbacés et indiquent la mise en place de nouvelles formations végétales. Les terrains pâturés, qui composent le *saltus*, sont

des formations herbacées secondaires, issues des déboisements et maintenues ouvertes par le pâturage et/ou par le débroussaillage (MAZOYER & ROUDART, 2002). Les landes à callune, décrites à partir de l'âge du Fer à HOR et du Moyen Âge à KOH et WAL (cf. 1.1.4.2), faisaient certainement partie du parcours du bétail et étaient ainsi maintenues ouvertes par le pâturage. En effet, le bétail était amené sur les jachères après l'arrêt des cultures pour pâturer la strate herbacée qui s'y développe au stade de jeune jachère puis la callune au stade de lande (BENSETTITI *et al.*, 2005 ; MAZOYER & ROUDART, 2002 ; ROCHEL, 2004).

Il existe encore dans le Pays de Bitche des formations végétales liées à l'élevage comme les pelouses acidiclinales, considérées comme artificielles, résultant des activités pastorales de pâturage ou de fauche. C'est le cas par exemple des pelouses à avoine des prés et genêt sagitté (*Aveno pratensis – Genistelletum sagittalis*, Kuhn 1937, Oberd. 1957) qui résultent d'un déboisement suivi d'une gestion pastorale extensive par pâturage des ovins (BENSETTITI *et al.*, 2005 ; FERREZ *et al.*, 2017 ; MULLER, 1986). Ces formations végétales encore présentes donnent une idée de ce que pouvaient être les formations composant le *saltus* dans notre région d'étude. Ces pelouses, composées principalement de graminées accompagnées d'arbrisseaux tels que la callune, sont assez cohérentes avec les taxons polliniques observés lors des phases de présence du bétail.

V.1.2.2.2. Le cas particulier du pâturage en forêt

Dans le Pays de Bitche, la diminution des pourcentages de pollens arboréens, liée aux fortes concentrations de micro-particules carbonisées, ainsi qu'à l'augmentation de la callune, est perçue dans les trois sites, à partir de l'âge du Fer. Bien que ces indices puissent attester de la mise en place de jachères herbacées, comme nous l'avons vu dans la précédente partie, leur présence contemporaine d'activité d'élevage peut également mettre en évidence un pâturage sous forêt. De plus, la présence plus marquée des spores trilètes, dont fait partie *Pteridium*, est également un bon marqueur de pâturage forestier car la fougère, toxique et insipide, est épargnée par le bétail (WOLTERS, 2007). Ces indices attestent donc d'une forêt exploitée par le pâturage, soumise à la « dent du bétail » et entretenue par le feu, ce qui engendre une réduction de sa surface et une propagation de la callune dans les trouées et les sous-bois clairs.

Ces observations sont cohérentes avec la pratique de la vaine pâture en forêt qui consiste à emmener les troupeaux de bovins et de porcs afin qu'ils se nourrissent de la strate herbacée

poussant en sous-bois. Comme la présence d'une canopée trop dense empêche la présence d'une strate herbacée, il est nécessaire de gérer et d'entretenir les forêts afin que le sous-bois soit assez lumineux pour permettre la régénération des herbes pâturées par le bétail. Ainsi, les sous-bois sont régulièrement fauchés, brûlés et les feuilles sont ratisées. Les espaces forestiers font alors l'objet d'une forte ouverture, accentuée par les dégâts causés par la « dent du bétail » qui limite la régénération de la forêt en consommant les jeunes pousses et les bourgeons (BEHRE, 1988 ; JEHIN, 2005 ; ROCHEL, 2015, 2004). Les espèces ligneuses sont ainsi très réduites, comme observé dans nos diagrammes, ne constituant plus que quelques îlots, et les herbacées se développent dans les nombreuses clairières et trouées qui parsèment la couverture forestière et s'allongent en suivant le parcours du bétail. Dans les Vosges, de nombreuses forêts sont ainsi réduites à des sortes de landes à callune où poussent seulement quelques chênes et bouleaux (ROCHEL, 2004). Ces landes expliqueraient encore une fois l'augmentation de la callune contemporaine des phases de pastoralisme observées dans nos séquences.

De plus, l'une des pratiques utilisée dans la gestion forestière pour le pâturage est l'entretien par les feux pastoraux (ROCHEL, 2015, 2010, 2004). Ils permettent d'éclaircir les sous-bois, d'amender les sols forestiers avec les cendres végétales et favorisent ainsi la strate herbacée. Le feu est également utilisé pour renouveler la callune qui compose les landes et qui est pâturée jusqu'à ce qu'elle devienne trop vieille pour être consommée par le bétail. Dans nos enregistrements, cette pratique des feux pastoraux est attestée par l'augmentation des micro-particules carbonisées, contemporaine du développement des Poaceae et de la callune. Ces micro-particules carbonisées proviennent donc très probablement des feux menés dans les forêts recouvrant les pentes des bassins versants des tourbières.

Un indice supplémentaire en faveur de la présence de ces feux sous forêt provient de la comparaison de trois signaux d'incendie différents. Pour le site de KOH, les micro-particules carbonisées ont été comptées sur les lames, les macro-particules carbonisées ont été comptées dans les niveaux de tourbe mais des macro-charbons issus de sol forestier, prélevés à moins de 200 m du point de prélèvement palynologique, ont également été identifiés et datés (analyse : V. Robin, LIEC, non publié). Les résultats montrent que la phase de micro-particules carbonisées identifiées entre 2710 et 1000 cal. BP n'est pas observée dans les macro-particules carbonisées issues de la tourbière, indiquant que les feux n'ont pas lieu localement sur la tourbière mais plus loin dans le bassin versant. En revanche, la présence, dans les sols forestiers

de deux fragments de charbons de chêne datés autour de 1001 cal. BP et 1674 cal. BP ainsi que d'un fragment de charbon de pin daté autour de 2415 cal. BP, attestent bien de la présence d'incendies locaux dans le sous-bois.

La pratique des feux pastoraux est bien documentée dans les archives des Vosges et des Vosges gréseuses. En effet, certains passages renseignent bien cette pratique : « *Ils y mettent même le feu à dessein pour renouveler la bruyère qui ne vaut plus rien à certain âge et pour bonifier le terrain par la cendre qui produit ensuite du pâturage* »¹¹ ou encore : « *mettre le feu aux bois de pins ou autres (...) pour avoir de l'herbe fraîche l'été pour leurs bestiaux, ou pour éclaircir les bois, afin de les garantir des loups* »¹².

La vaine pâture a donc été une pratique très répandue et a eu un impact important sur le paysage du Pays de Bitche et notamment sur ses forêts. Celles-ci ont également été le lieu d'une autre pratique pastorale dont les paysans jouissaient du droit d'usage : la grasse pâture. Cette pratique consistait à mener les porcs en forêt pour qu'ils se nourrissent des glands (et des faines) qu'ils trouvent au sol.

V.1.2.2.3. La grasse pâture

Nos enregistrements montrent qu'au cours des périodes de présence de bétail (spores de champignons coprophiles, IPA) et de pratique de la vaine pâture (recul de la forêt, micro-particules carbonisées et callune), les pourcentages du chêne augmentent fréquemment autour des sites étudiés (Figure V.1-2). Dans tous les sites, cette hausse des pourcentages des pollens de chêne intervient alors que les autres essences, essentiellement le pin et le hêtre se font plus rares. Ainsi, à partir de 2860 cal. BP à HOR et de 2325 cal. BP à KOH, les pourcentages des pollens de chêne sont de plus en plus importants, alors que les deux autres essences principales (pin et hêtre) sont en nette régression dans les forêts du bassin versant. À KOH, les pourcentages de pollens de chêne atteignent leur valeur maximale (37,5%) en même temps que ceux de la callune qui atteignent 4,7% autour de 1355 cal. BP. Il en est de même autour de Waldeck où les pourcentages de pollens de chêne augmentent à trois reprises : à l'âge du Fer, au cours de l'époque romaine puis au Moyen Âge. La dernière phase de développement du

¹¹ d'après A.D.M.M B 12116, retranscrit par ROCHEL, 2004

¹² Chabert Delisle, Mémoire au sujet des bois de Provence, 1723, retranscrit par ROCHEL, 2004

chêne, au Moyen Âge, est la plus importante des trois et s'étend de 900 cal. BP (24,5%) à 670 cal. BP (38,7%). Pendant cette période, la courbe du rapport AP/T montre une forte chute, de 81,7% à 64,9%.

Ces phases de développement du chêne dans les bassins versants des sites, liées à la présence de bétail et à la mise en place d'un système de pâturage, indiquent la pratique de la grasse pâture. En effet, pour augmenter la capacité nourricière de la forêt, et donc favoriser l'abondance de glands dans les sous-bois, le chêne a depuis très longtemps été maintenu préférentiellement dans les forêts pâturées (BEHRE, 1988 ; DION, 1970). Déjà à l'époque romaine, il est fait état d'une distinction entre la *silva vulgaris* et la *silva glandiferae* (BEHRE, 1988). La sélection du chêne pour le panage a également été mentionnée, au Moyen Âge et à l'époque moderne, dans des études polliniques menées sur le Plateau Lorrain, dans les Vosges et en Allemagne dans le Palatinat (BEGEOT *et al.*, 2019 ; LEMEE, 1955 ; RUFFALDI *et al.*, 2007 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015 ; WOLTERS, 2007). En plus de cette sélection anthropique, le chêne est également favorisé par l'aspect semi-ouvert des forêts pâturées qui permet aux différentes espèces de chêne, qu'elles soient héliophiles (*Quercus robur*) ou de demi-ombre (*Quercus petraea*) de se développer dans les sous-bois. Le chêne devient alors, dans ces conditions, plus compétitif que le hêtre qui, naturellement le supplanterait en tant qu'espèce sciaphile qui se développe facilement sous les chênes, comme cela est observé de nos jours dans les zones en libre évolution de la Réserve Naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche.

Ainsi, autour de nos sites, lorsque la grasse pâture est pratiquée sur de longues années, les forêts s'enrichissent en chênes et de nombreuses trouées sont ouvertes, dans lesquelles des landes à callune se propagent. Puisque le chêne est protégé pour ses glands, les populations doivent, pour répondre aux autres besoins en bois (construction, chauffage...), couper les autres essences présentes comme le hêtre mais plus encore le pin qui abonde dans l'environnement. Ceci explique alors la raréfaction des pollens de hêtre et le dramatique déclin du pin observés dans nos enregistrements lorsque le chêne atteint ses valeurs maximales dans les trois sites. Ces résultats montrent donc que dans le Pays de Bitche, depuis l'âge du Fer, les pratiques de la vaine et de la grasse pâtures ont eu de forts impacts sur la structure du paysage et du couvert forestier ainsi que sur la composition des boisements.

Les activités de vaine et de grasse pâtures assurent la subsistance du bétail pendant une bonne partie de l'année mais lors de la mauvaise saison, les ressources manquent et les troupeaux sont mis en stabulation (MAZOYER & ROUDART, 2002). Or, pour résoudre le problème de la disponibilité du fourrage pendant l'hiver, des prairies de fauche sont entretenues dès l'Antiquité.

V.1.2.2.4. Les prairies de fauche

Déjà utilisées de manière très réduite au cours de l'Antiquité, la pratique de la fauche et l'utilisation du foin se développent lors de la révolution agricole du Moyen Âge (XI-XIIIème siècle dans le nord de l'Europe) (MAZOYER & ROUDART, 2002). Ces pratiques font partie d'un système agropastoral qui est complété par la stabulation du bétail et par l'utilisation du fumier. Les prairies de fauche se multiplient alors dans le paysage. Dans les Vosges, la place importante occupée par le bétail induit la présence de nombreux prés de fauche et place le système agricole dans un système de type fourrager (ROCHEL, 2004). Dans le Pays de Bitche, où notre étude montre que l'élevage est bien établi depuis l'âge du Fer, des prairies de fauche devaient également être mises en place. D'autant plus que contrairement aux pâturages qui peuvent être installés dans des endroits pierreux, accidentés et semi-fermés, les prairies de fauche sont très souvent installées sur les terrains humides, comme nous le verrons par la suite dans les fonds de vallons tourbeux du Pays de Bitche (cf V.3.2) (MAZOYER & ROUDART, 2002).

De nos jours, une formation de pelouse à botryche lunaire et féтуque à feuilles capillaires (*Botrychio lunariae-Festucetum filiformis*) est observée dans le Pays de Bitche, et est maintenue par une fauche traditionnelle ou par un pâturage ovin (FERREZ *et al.*, 2017). Sa composition floristique pourrait correspondre à ce que l'on observe dans nos enregistrements polliniques car ce milieu est dominé par les graminées mais comprend également des espèces faisant partie de taxons polliniques identifiés dans nos diagrammes (Figure V.1-2). On y trouve par exemple des Anthemideae et des Fabaceae, mais aussi *Plantago lanceolata*, *Rumex acetosa* et *R. acetosella* (BENSETTITI *et al.*, 2005 ; FERREZ *et al.*, 2017 ; MULLER, 1986).

De nos jours, les prairies de fauche sont encore présentes dans les Vosges du Nord où elles représentent deux tiers des surfaces en herbe alors que les prairies pâturées n'en représentent qu'un tiers (PLANTUREUX & BAYEUR, 2013).

Pour résumer, nous avons vu que l'élevage du bétail, abondant dans les Vosges du Nord et plus localement dans le Pays de Bitche, a induit au cours du temps l'apparition de nouveaux milieux et de nouvelles formations végétales, ainsi que la réorganisation du paysage. Les forêts pâturées, les prairies pâturées, les jachères et les prairies de fauche sont autant de formations dont la présence peut être envisagée autour de nos sites.

Au travers de ces résultats, la forêt, largement dominante dans les paysages des Vosges du Nord, apparaît comme un lieu largement exploité et utilisé, autant pour la céréaliculture que pour l'élevage. Cependant, aux côtés de ces activités agropastorales fondamentales à la subsistance des populations, d'autres activités ont nécessité l'exploitation du bois comme combustible.

V.1.3. Les activités pré-industrielles xylophages

Parmi ces activités, nous avons vu au chapitre I (cf I.2.2.2) que la verrerie est une industrie importante depuis le XV^{ème} siècle, d'abord itinérante puis sédentaire à partir du XVIII^{ème} siècle. Mais l'impact de cette activité sur le paysage est difficile à percevoir par le biais d'analyses polliniques et géochimiques car les verreries se manifestent essentiellement par l'exploitation de cantons forestiers pour assurer la forte consommation de bois comme combustible, par le brûlage des fougères et l'extraction de sable. Ainsi, ces activités pourraient provoquer une diminution des pollens d'arbres ou des spores de fougères, ou encore l'augmentation des indices de feu, mais nous avons vu dans les parties précédentes que ces indices ne sont pas exclusifs des activités de verrerie.

De même, les activités métallurgiques sont essentiellement caractérisées par leur très important besoin en combustible, qui se manifeste là encore dans les diagrammes polliniques par une diminution des pollens d'arbres, dont l'origine peut être brouillée par la présence contemporaine d'activités agropastorales (MARIET, 2016). En revanche, les phases d'activités métallurgiques ont engendré, lors des étapes de réduction du minerai et de transformation, une pollution métallique qui s'est enregistrée dans les tourbières. Ainsi, la comparaison des résultats géochimiques et polliniques peut permettre de reconstituer l'histoire de la métallurgie et d'en discuter les impacts sur le paysage.

V.1.3.1. Les phases d'activités métallurgiques dans les Vosges du Nord

Dans nos sites, plusieurs phases de métallurgie, locale ou régionale, sont identifiées à différentes époques, dont la plus ancienne date de l'âge du Bronze.

En effet, les enregistrements XRF montrent une première augmentation des rapports Pb/Ti, Zn/Ti, Cu/Ti et Fe/Ti, donc des apports allochtones de plomb, zinc, cuivre et fer à partir de 3950 cal. BP à WAL et de 3250 cal. BP autour de HOR, avec un premier maximum autour de 3500 cal. BP à WAL et de 2900 cal. BP à HOR (Figure V.1-3, phase 1). Ces premiers indices d'une pollution métallique sont contemporains d'une forte présence de micro-particules carbonisées ainsi que d'un recul des arbres, principalement *Quercus* et *Pinus*, auxquels s'ajoute *Fagus* pour le site de HOR. L'augmentation des micro-particules carbonisées est probablement liée à la combustion du bois utilisé pour alimenter les fourneaux ainsi que les forges. Mais elles peuvent également provenir de nombreuses autres activités, et en particulier des activités agropastorales qui se développent simultanément à cette époque. Elles ne constituent donc pas des indices exclusifs des activités métallurgiques, tout comme nous l'avons abordé pour le recul des arbres (MIGHALL *et al.*, 2017). Cependant, la corrélation des différents indices de pollutions métalliques, de feux et du recul des arbres met très probablement en évidence une phase d'activité métallurgique régionale, accompagnée par une potentielle exploitation des forêts du bassin versant pour l'approvisionnement en combustible.

Ces indices d'une première métallurgie dans les Vosges du Nord à l'âge du Bronze sont cohérents avec la découverte de nombreux objets en bronze datés de cette époque comme le poignard de Bitche (SCHMIT *et al.*, 2017). La hausse des apports de cuivre serait ainsi expliquée par son utilisation pour composer le bronze, alliage de cuivre et d'étain et l'augmentation du plomb et du zinc peut être expliquée par la présence de ces deux métaux associés dans le minerai de cuivre. De plus, dans les Vosges cristallines, FOREL *et al.* (2010) identifie une potentielle phase de métallurgie locale entre 2000 et 1500 cal. BC (soit entre 3950 et 3450 cal. BP) qui apparaît chronologiquement très proche de celle identifiée à WAL, et qui indique que la métallurgie est pratiquée à cette époque à l'échelle du Massif des Vosges ainsi que dans d'autres massifs de moyenne montagne comme le Morvan (Figure V.1-4) (FOREL *et al.*, 2010 ; JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007 ; MONNA *et al.*, 2004).

De manière générale, ces phases d'apport d'éléments métalliques dans la région sont cohérentes avec ce que l'on connaît de la métallurgie de l'âge du Bronze en Europe car à cette

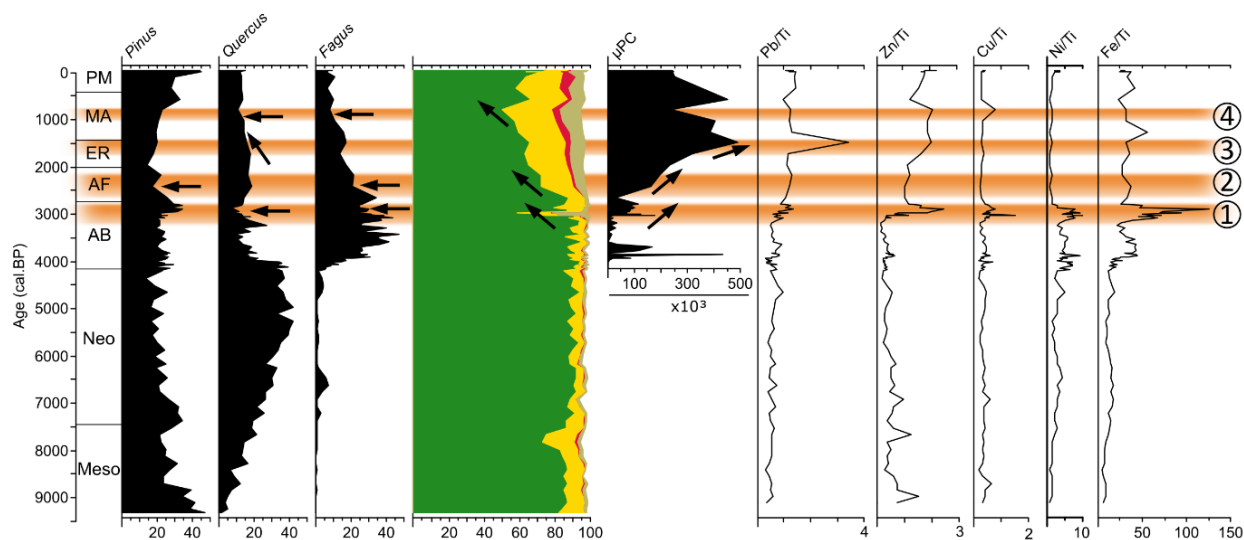
époque, une technique de purification du minerai plomb-zinc-argent, permettant d'en séparer les différents métaux est inventée et est à l'origine d'une première pollution généralisée dans l'hémisphère nord (ARNAUD, 2003).

À l'âge du Fer, à partir de 2700 cal. BP à HOR et de 2350 cal. BP à WAL, les apports allochtones en plomb, zinc, nickel et fer augmentent, avec en plus des apports en cuivre à WAL (Figure V.1-3, phase 2). Les particules carbonisées sont encore en augmentation ou très abondantes aux mêmes périodes. Autour du site de HOR, les arbres reculent indiquant l'exploitation de la forêt (surtout hêtre et pin), alors que les indices d'activités agropastorales explosent. La forêt de Bitche a donc pu être en partie exploitée à cette époque pour alimenter des fourneaux ou des forges de la région. En revanche, autour de WAL, les arbres (*Pinus*, *Quercus*, *Fagus*) reviennent et les indices d'occupations humaines (céréales et IPA) régressent, indiquant que la forêt de Waldeck n'est pas exploitée à cette époque.

Le signal de pollution enregistré dans les deux sites est cohérent avec l'existence d'une exploitation de minerai de fer dans le grès des forêts de Mouterhouse (6 km au SO de WAL et au S de HOR) dont l'extraction remonterait à l'âge du Fer (SCHMIT *et al.*, 2017). De plus, l'augmentation de la teneur en plomb anthropique dans les enregistrements régionaux (Vosges, Forêt Noire, Morvan, Figure V.1-4, phase 2) et européens est bien connu à cette époque et atteste de la présence solide de mines et d'activités métallurgiques en Europe, dont le signal est enregistré jusqu'au Groenland (FOREL *et al.*, 2010 ; JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007 ; LE ROUX, 2005 ; MONNA *et al.*, 2004).

À l'époque gallo-romaine, les deux sites enregistrent une augmentation des apports allochtones en plomb, zinc et cuivre à partir de 1900 cal. BP (Figure V.1-3, phase 3). C'est à cette époque, autour de 1500 cal. BP, que le rapport Pb/Ti atteint son maximum enregistré dans la tourbière de HOR. Ces augmentations sont encore une fois contemporaines de fortes quantités de micro-particules carbonisées et correspondent à une période de recul du chêne, sans doute exploité pour les activités métallurgiques.

Tourbière de La Horn



Tourbière de Waldeck

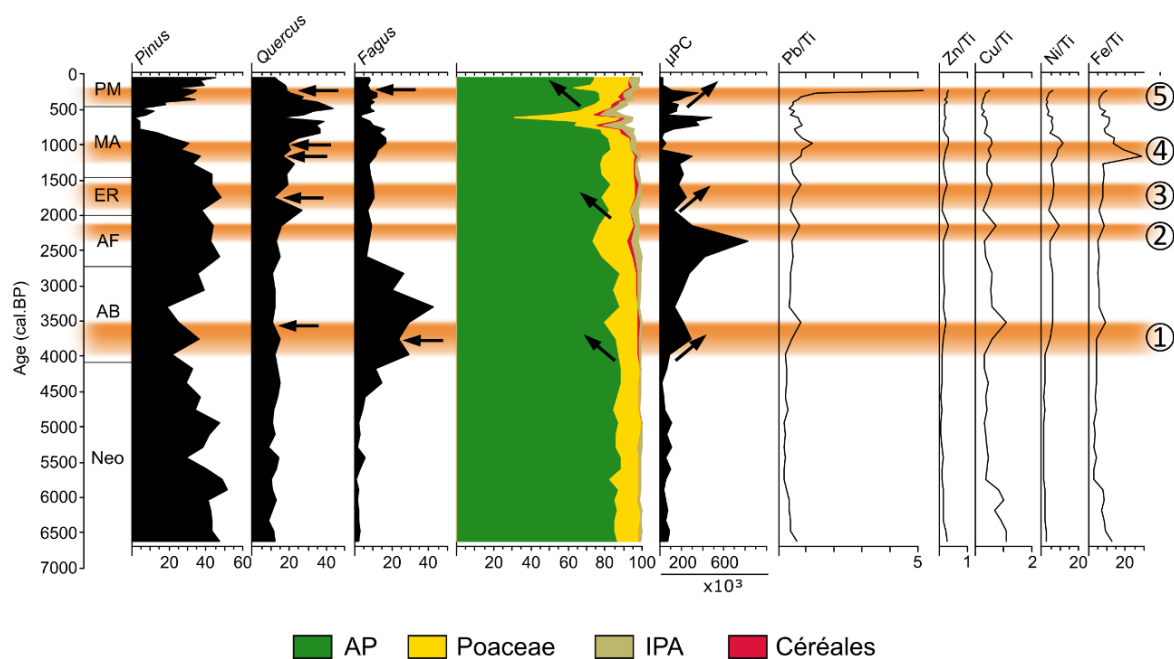


Figure V.1-3 : Diagrammes simplifiés présentant les principaux taxons arboréens, les micro-particules carbonisées et les courbes des rapports « élément métallique/titane » (AP : arboreal pollens ; IPA : indicateurs polliniques d'anthropisation ; µPC: micro-particules carbonisées ; PM : période moderne, MA : Moyen Âge ; ER : époque romaine ; AF : âge du Fer ; AB : âge du Bronze ; Neo : Néolithique ; Meso : Mésolithique ; 1, 2, 3, 4, 5 : phases d'activités métallurgiques identifiées d'après nos résultats)

Des découvertes archéologiques confirment la présence de forges dans le Pays de Bitche à cette période, comme à Achen en pays découvert ou l'atelier de bronzier de Walschbronn (à la limite pays couvert/découvert). Sur le versant alsacien des Vosges du Nord, l'extraction et le travail du fer ont également été démontrés dans la ville de Reishchoffen par la découverte de

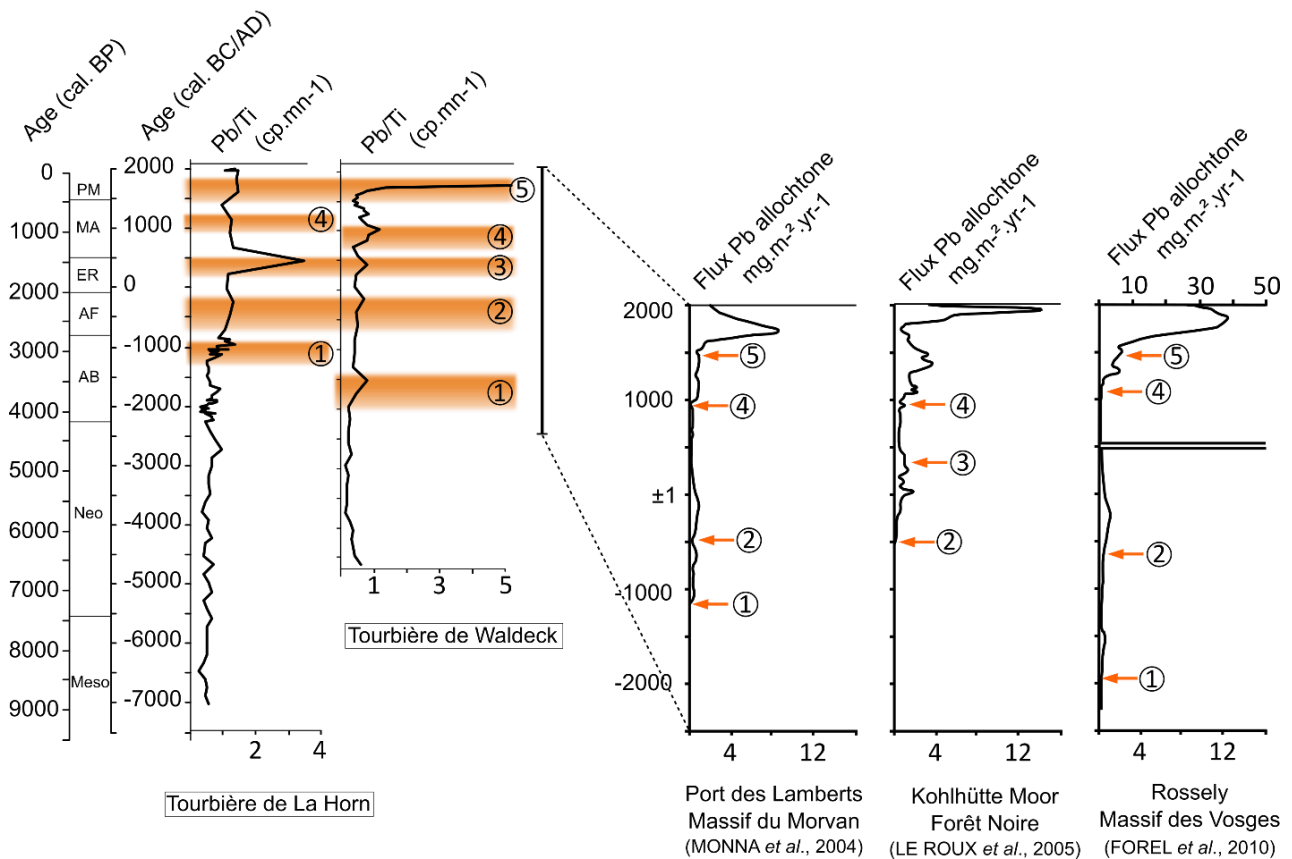
traces de bas-fourneau gallo-romain (FLOTTE *et al.*, 2000). À l'époque romaine, les activités métallurgiques sont donc largement répandues dans les Vosges du Nord, et bien que ces découvertes se localisent sur les marges du massif, la présence de sites métallurgiques dans le pays couvert s'inscrit, d'une part, dans la continuité de la période précédente, pour laquelle l'extraction du minerai est envisagée et, d'autre part, dans le contexte métallurgique régional.

De plus, en Europe, de nombreuses tourbières enregistrent également un important signal de contamination par le plomb au cours de la période romaine, comme par exemple dans la Forêt Noire à 150 km des sites (Figure V.1-4) (ARNAUD, 2003 ; LE ROUX, 2005 ; MAGNY, 2019).

Le Moyen Âge est connu pour ses activités d'extraction et de travail du métal. À WAL, à partir de 1300 cal. BP, les pollutions métalliques d'origine anthropique (Pb, Zn, Ni et Fe) augmentent dans la tourbe et deux pics d'apport de plomb, enregistrés autour de 1150 cal. BP et 975 cal. BP, sont contemporains de petites régressions du chêne (Figure V.1-3, phase 4). Autour du site de HOR, les apports en cuivre, en zinc et dans une moindre mesure en plomb augmentent légèrement entre 1000 cal. BP et 800 cal. BP (Figure V.1-3, phase 4). Cette phase de pollution métallique est contemporaine d'une légère régression du chêne et du hêtre. Les tourbières du Pays de Bitche enregistrent donc des activités métallurgiques médiévales entraînant l'exploitation des principaux feuillus présents autour des sites (chêne et hêtre).

Cette phase d'activités métallurgiques est cohérente avec le contexte de croissance démographique au XI^{ème} siècle dans le massif des Vosges. En Europe, le Moyen Âge connaît un essor des activités métallurgiques qui émettent de très grandes quantités de plomb dans l'atmosphère (ARNAUD, 2003 ; MAGNY, 2019). Cet essor est par exemple enregistré dans les tourbières du Morvan (JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007 ; MONNA *et al.*, 2004), de la Forêt Noire (LE ROUX, 2005) et des Vosges (FOREL *et al.*, 2010) à partir de 1000 cal. AD (Figure V.1-4, phase 4), comme observé dans le Pays de Bitche.

Pour l'époque moderne, à partir de 400 cal. BP, soit autour de 1550 cal. AD, le site de WAL enregistre une très forte augmentation des apports en plomb dans la tourbière (Figure V.1-3, phase 5). Cette forte pollution est liée à une importante augmentation des particules carbonisées et à une importante diminution du chêne, qui dominait jusqu'alors le paysage, ainsi qu'à un léger recul du hêtre à partir de 315 cal. BP. Autour de 200 cal. BP, le recul du couvert forestier qui atteint son deuxième minimum de la séquence (63%) ne correspond pas à une intensification des activités agro-pastorales.



Ces indices illustrent le développement des activités métallurgiques dans le Pays de Bitche qui est cohérent avec les données historiques et notamment avec l'envie du duc de Lorraine d'exploiter les ressources minières de la région, en encourageant l'installation de sites métallurgiques à partir du XVI^{ème} siècle. À cette occasion, des prospections de minerai avaient permis de redécouvrir du minerai de fer près de Mouterhouse (6 km au SO de WAL et au S de HOR), qui sera exploité par la forge de Mouterhouse à partir de 1611. Puis, après la Guerre de Trente Ans, lors de la croissance démographique et économique du XVIII^{ème} siècle, de nombreuses usines (Baerenthal, Zinswiller, Mouterhouse...) sont créées dans le Pays de Bitche et les grandes usines de l'entreprise De Dietrich, localisées sur le versant alsacien des Vosges du Nord (Reishoffen, Niederbronn) voient le jour (JEHIN, 2005). À proximité du site de WAL, une forge est également installée le long du ruisseau du Falkensteinerbach, comme en témoigne la carte de Cassini, attestant d'activité de travail du fer localement (Figure V.1-5).



Figure V.1-5 : Localisation d'une forge sur le Falkensteinerbach à proximité du site de Waldeck, sur la carte de Cassini (XVIIIème siècle) (source : ©IGN2019, ©Géoportail)

La forte augmentation des émissions de plomb anthropique est également clairement enregistrée dans les tourbières du Morvan et des Vosges autour de 1500 cal. AD, ce qui témoigne de l'aspect global de l'essor métallurgique à partir du XVIème siècle (Figure V.1-4, phase 5) et de manière générale à l'échelle de l'hémisphère nord (FOREL *et al.*, 2010 ; MAGNY, 2019 ; MONNA *et al.*, 2004).

V.1.3.2. L'exploitation des forêts par les activités métallurgiques

Les activités métallurgiques sont reconnues comme nécessitant une telle quantité de bois comme combustible qu'elles ont engendré des défrichements intenses et généré une « dénudation du paysage » dans les Vosges (FLUCK, 2006 ; FLUCK & ANCEL, 1989 ; JEHIN, 2005 ; MARIET, 2016). En effet, elles ont nécessité d'une part du bois d'œuvre, par exemple afin d'étayer les mines, et d'autres part du combustible transformé en charbon de bois.

Autour de nos sites, l'environnement reste très boisé jusqu'à l'âge du Fer à HOR et jusqu'au Moyen Âge à WAL avec des pourcentages respectivement autour de 90% à HOR et 80% à WAL. Un paysage clairement ouvert n'est attesté que brièvement au Moyen Âge pour les deux sites

(50% à HOR, 30% à WAL). En dehors de ces grandes ouvertures lors desquelles les bassins versants étudiés sont le lieu d'intenses activités agropastorales, la forêt recule régulièrement mais jamais en dessous de 60% dans les deux sites. Bien que les phases d'activités métallurgiques identifiées dans la région depuis l'âge du Bronze soient associées à de légers reculs du chêne et/ou du hêtre dans nos diagrammes polliniques, elles n'ont donc jamais entraîné une mise à nu des bassins versants des sites étudiés.

Plusieurs indices témoignent cependant d'une industrialisation de la production de charbon de bois dans les forêts du Pays de Bitche à partir du XVII^{ème} siècle. Des prospections et un relevé LIDAR réalisés dans le Pays de Bitche révèlent en effet la présence d'un nombre très important de charbonnières, dont de nombreuses sont directement localisées dans les bassins versants de nos sites (Figure V.1-6, données non publiées).

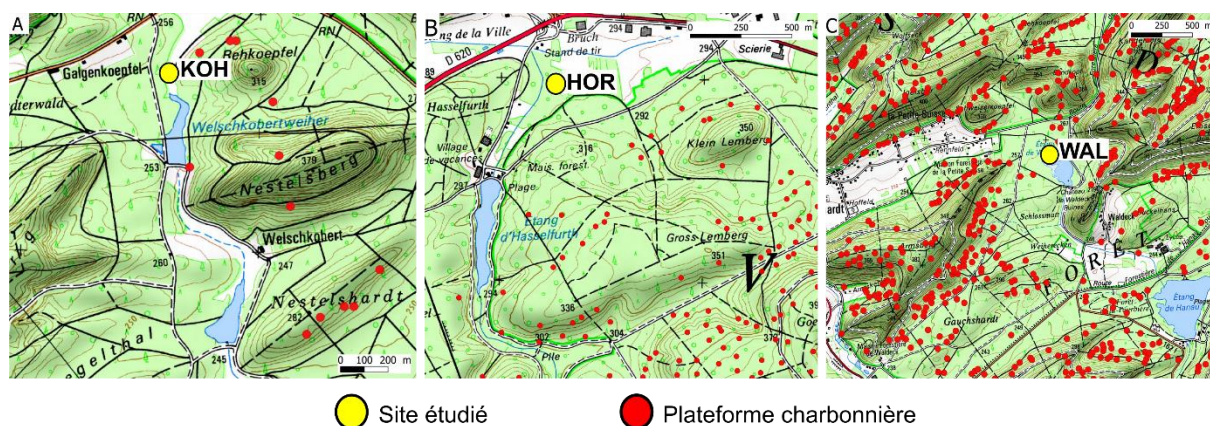


Figure V.1-6 : Inventaire préliminaire des charbonnières autour des sites d'étude sur la base de prospections de terrain (A) et de pointages sur données LIDAR (B et C –LIDAR ©LIEC2018) (source : V.Robin, données non publiées)

Une étude anthracologique réalisée dans quatre bassins versants de la Zinsel du Nord, localisés entre 6 et 10 km au sud et au sud-ouest du site de WAL a daté leur période d'utilisation du milieu du XVII^{ème} siècle au milieu du XX^{ème} siècle (GOCEL-CHALTE *et al.*, 2020). La présence de ces nombreuses charbonnières directement à proximité de nos sites montre donc bien que la forêt est localement exploitée pour produire du charbon de bois au moment de l'apogée des activités métallurgiques dans les Vosges du Nord. Les textes historiques indiquent également que les usines de l'entreprise De Dietrich s'approvisionnent en combustible dans les forêts du Comté de Bitche, et notamment à proximité de nos sites (JEHIN, 2008, 2005 ; ROCHEL, 2017) (Figure V.1-7).

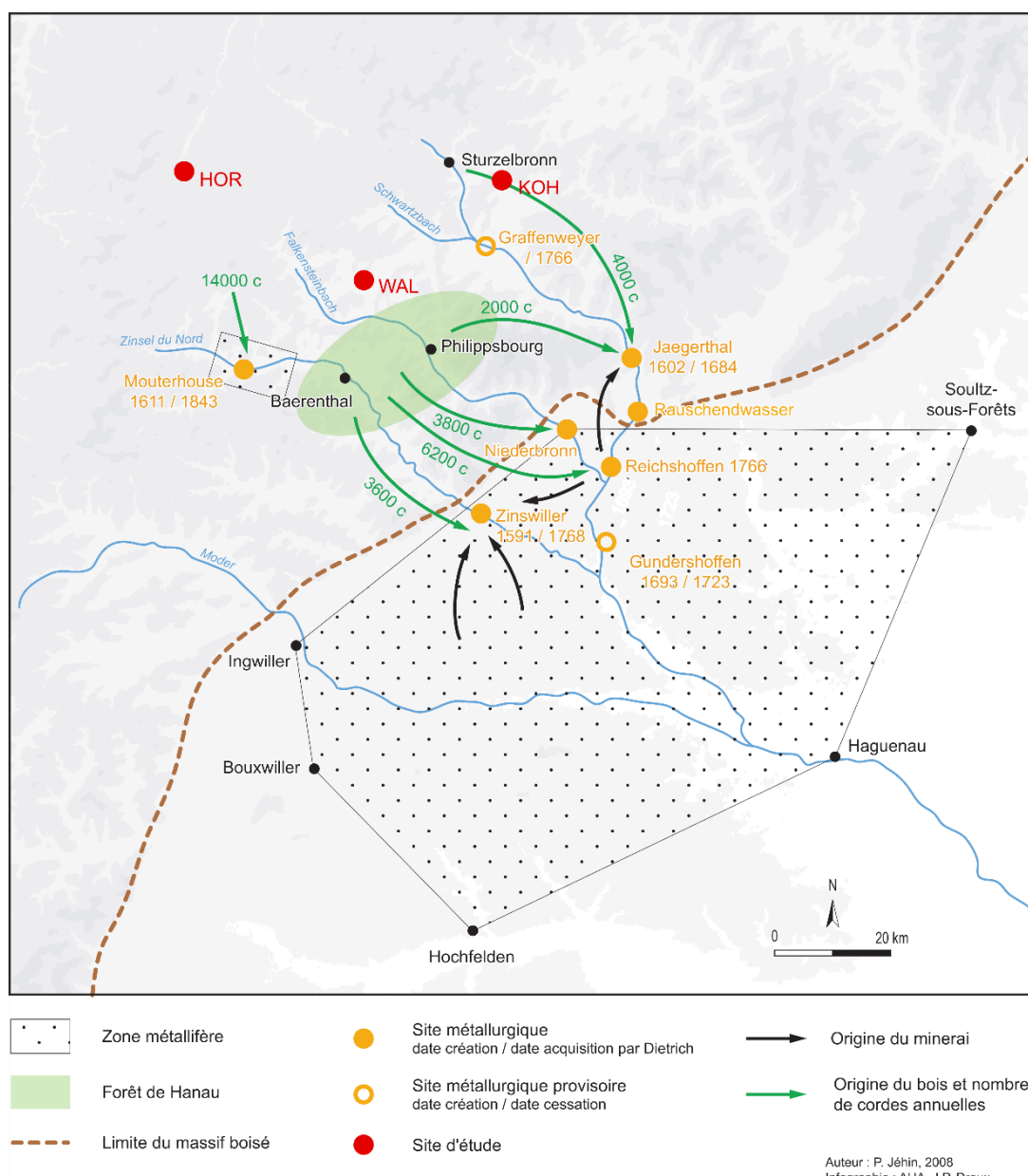


Figure V.1-7 : Stratégie d'approvisionnement en bois et en minerais des sites de l'entreprise De Dietrich au XVIII^e siècle dans les Vosges du Nord (d'après JEHIN 2008)

Malgré ces indices d'exploitation, nos enregistrements montrent que l'environnement du Pays de Bitche reste un paysage boisé et que les forêts font donc sûrement l'objet d'une gestion forestière raisonnée. Or, pour le XVIII^e siècle, l'étude des registres de martelage du Pays de Bitche confirme ces observations car elle indique que les forêts du Comté sont dans un assez bon état et que les coupes attribuées à l'industrie ont des réserves sur pieds équivalentes aux autres coupes, bien que les arbres anciens soient en léger déficit (ROCHEL, 2017). À cette époque, la majorité des forêts lorraines est gérée en taillis sous futaie dans

lesquelles le taillis est exploité tous les 25 ans environ pour fournir du bois de feu et alimenter la production de charbon de bois à l'usage des mines et forges (ROCHEL, 2017).

La durée de la coupe peut en partie expliquer que les ouvertures liées à la production de charbon ne soient pas visibles dans les diagrammes polliniques puisque les feuillus ont rarement atteint leur maturité et ne pollinisent pas encore au bout de 25 ans, l'âge moyen de fructification du chêne et du hêtre étant de 60 ans (COCHET, 1959). Les arbres du taillis ne participant donc pas à la pluie pollinique, leur coupe n'entraîne pas de chute visible dans les pollens d'arbres dans nos diagrammes. L'exploitation de bois de petit calibre pour alimenter la production de charbon est également confirmée dans les anciennes plateformes charbonnières des quatre bassins versants de la Zinsel du Nord par une étude des calibres qui montre un diamètre moyen des bois brûlés de 8,7 cm, associé à l'exploitation du taillis, de jeunes arbres ou de grosses branches. (GOCEL-CHALTE *et al.*, 2020).

De plus, comme nous l'avons vu au chapitre I, les industries disposent de différents modes d'approvisionnement en bois (attribution de cantons forestiers, achat de droits d'exploitation, achat de bois) qui permettent un contrôle de l'exploitation des forêts et contribuent à limiter l'impact des activités industrielles sur le paysage, bien que les cantons eux-mêmes puissent être surexploités, ce qui ne peut en revanche pas être perçu dans l'enregistrement pollinique (JEHIN, 2005).

Le maintien d'un paysage boisé dans une région d'intenses activités métallurgiques est également observé dans les Vosges Centrales où les analyses polliniques réalisées dans les tourbières du Champ du Feu et du Hury (vallée de Sainte-Marie-aux-Mines) montrent que malgré les importantes activités métallurgiques de la région, les pourcentages de taxons arboréens restent supérieurs à 40-50%, dépeignant une situation forestière bien différente des pénuries évoquées par les archives historiques (MARIET, 2016).

Dans le Morvan, au Mont Lozère et dans le Pays Basque, ces activités ont induit une modification de la végétation, caractérisée par des ouvertures du couvert forestier depuis le Bronze final (JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007). Cependant, comme le nuance MIGHALL *et al.* (2017), bien que la forêt soit effectivement exploitée, les ouvertures restent à une petite échelle et sont temporaires, comme observé au Pays de Galles, en Irlande ou encore en Autriche. La forêt reste donc résiliente aux prélèvements de bois de feu pour cette industrie, comme le montre le retour des arbres chaque fois que les pollutions métalliques diminuent (MIGHALL *et al.*, 2017).

V.1.3.3. La sélection des essences

Une autre question que l'on peut se poser concerne la sélection d'essences particulières en fonction de leurs propriétés, en tant que combustible ou pour produire du charbon de bois. En effet, il est reconnu que le chêne est un bon combustible et que son charbon de bois est estimé en métallurgie, tout comme le hêtre qui constitue un excellent bois de feu et un très bon charbon de bois recherché par les fonderies (BOUGEL, 2004 ; JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007 ; LIEUTAGHI, 2004 ; RAMEAU *et al.*, 1989 ; ROCHEL, 2017). Le chêne est également utilisé comme bois de mine, pour étayer les porches d'entrée, tout comme le pin (LIEUTAGHI, 2004 ; RAMEAU *et al.*, 1989).

Cette question a été abordée dans le Morvan, au Mont Lozère et dans le Pays Basque où les analyses polliniques ont montré que les phases d'activités métallurgiques sont toujours accompagnées d'une régression du hêtre dans les deux premières régions, alors qu'elles sont plutôt liées à la diminution du chêne dans la troisième (JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007).

Dans nos sites, il est difficile de percevoir l'utilisation préférentielle du hêtre ou du chêne, bien que le chêne semble souvent plus affecté autour de WAL (Figure V.1-3). En revanche, la composition du spectre anthracologique des charbonnières de la vallée de la Zinsel du Nord montrent une dominance du hêtre (58,7%), suivi par le chêne (26,9%) (GOCEL-CHALTE *et al.*, 2020). Les résultats anthracologiques, complétés par une analyse spatiale de la distribution des plateformes montrent que la composition des spectres anthracologiques est dépendante des ressources locales, qui sont elles-mêmes liées aux conditions topographiques locales. Ainsi, le hêtre, dominant les forêts du *Luzulo-Fagetum* sur les pentes exposées au nord, est remplacé par le chêne et le pin dans les spectres des charbonnières localisées sur les versants exposés au sud, où dominant les forêts du *Betulo-Quercetum*.

Le pin est très peu présent dans les spectres des sites de la vallée de la Zinsel du Nord (GOCEL-CHALTE *et al.*, 2020). Les auteurs expliquent ces faibles proportions par la faible présence du pin dans l'environnement, l'hypothèse selon laquelle le pin n'était pas sélectionné pour produire du charbon de bois étant écartée au vu de sa présence dans les charbonnières des Vosges, d'Allemagne et de Belgique. Cette hypothèse semble contradictoire avec les analyses polliniques menées sur nos trois sites qui montrent une très forte présence du pin. Cependant, les sites de WAL et KOH, qui enregistrent des pourcentages de pollens de pin très importants, sont localisés dans des zones du Pays de Bitche reconnues pour leur abondance en pins (autour

d'Eguelshardt et notamment la foresterie de Waldeck, Philippsbourg et Sturzelbronn) alors que les conifères sont moins présents dans la végétation actuelle des bassins versants étudiés sur la Zinsel du Nord. Cette observation va dans le sens de l'exploitation pour le charbonnage des essences disponibles dans l'environnement avec une nette préférence pour les feuillus lorsque ceux-ci sont présents et une utilisation secondaire du pin lorsqu'il est la seule essence abondante dans l'environnement immédiat (GOCEL-CHALTE *et al.*, 2020 ; KNAPP *et al.*, 2013 ; LUDEMANN, 2010 ; MIGHALL *et al.*, 2017).

Dans le Pays de Bitche, une comparaison de la répartition hêtre/chêne et la localisation des différentes industries (verrerie/forge) (Figure V.1-8) laisse à penser que l'exploitation des forêts par l'une ou l'autre de ces activités a pu induire la distribution géographique des deux essences (ROCHEL, 2017). Le chêne, fournissant un bon charbon de bois, domine à l'est, où se trouvent essentiellement des forges et le hêtre, préférentiellement utilisé par les verriers comme bois de chauffe mais également pour produire la potasse, est plus abondant à l'ouest autour des verreries. Mais l'étude des registres de martelage du XVIIIème siècle (entre 1748 et 1785) montre que ces essences ont déjà cette répartition peu de temps après le renouveau industriel qui intervient dans le Pays de Bitche à partir des années 1720-1730 (ROCHEL, 2017). Il est donc peu probable d'attribuer la répartition est/ouest du chêne et du hêtre à l'approvisionnement des industries aux XVIIIème et XIXème siècles (ROCHEL, 2017). On peut alors se demander quel était l'impact des activités antérieures à la Guerre de Trente ans mais les industries de cette époque sont mal connues (ROCHEL, 2017).

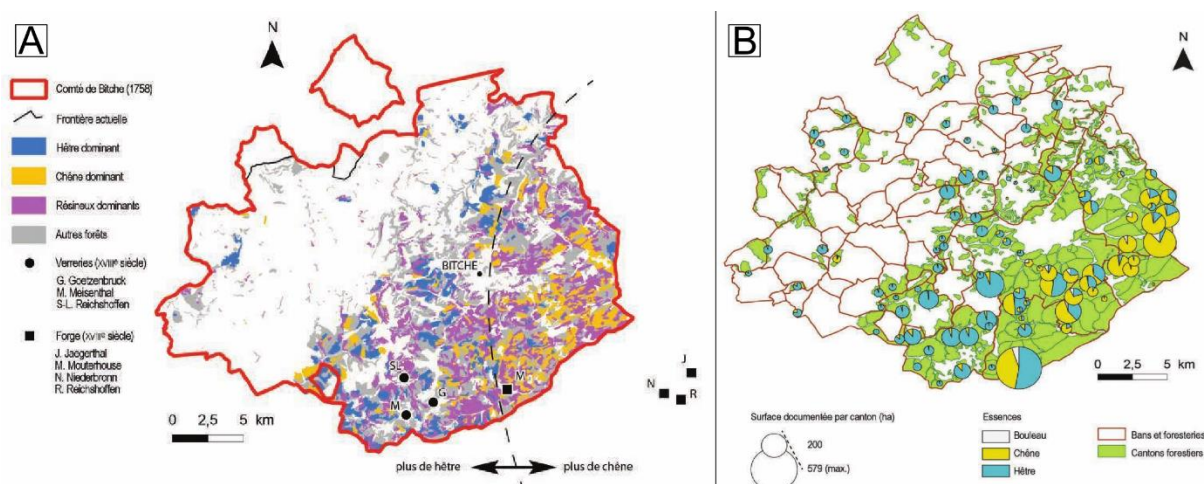


Figure V.1-8 : Carte de la répartition actuelle du chêne et du hêtre et localisation des anciennes forges et verreries du XVIIIème siècle (A), et carte de la répartition du hêtre et du chêne selon les registres de martelage du XVIIIème siècle (source : ROCHEL, 2017)

La contribution des analyses polliniques pour répondre à cette problématique est limitée par la capacité de dispersion des pollens qui diffère entre les deux essences : le chêne est très souvent sur-représenté dans les enregistrements polliniques, alors que les pollens de hêtre sont peu dispersés au-delà des boisements (MIRAS, 2009 ; TAMBOER-VAN DEN HEUVEL & JANSSEN, 1976). Cependant, les courbes polliniques ne montrent pas de variation importante des pourcentages de ces deux essences depuis la fin du Moyen Âge. À partir de cette époque, les pourcentages polliniques des deux essences se stabilisent autour de 10% dans les trois sites, à l'exception de WAL où le chêne est mieux représenté mais diminue progressivement jusqu'au sommet de la séquence. Il semble donc que l'exploitation des forêts du Pays de Bitche pour l'approvisionnement des industries n'a jamais fortement impacté la composition spécifique des boisements autour des trois sites étudiés.

V.2. Utilisation des zones humides et mise en place de leur végétation actuelle

Les activités humaines ne sont pas uniquement pratiquées dans les forêts du bassin versant ou sur les sols secs, mais certaines d'entre elles vont s'établir dans les fonds de vallons humides, directement aux abords ou sur la tourbière elle-même, engendrant d'importantes modifications de la végétation locale.

V.2.1. Pratiques agro-pastorales sur les zones humides

Parmi ces activités, le pastoralisme a longtemps privilégié l'utilisation des zones humides, des prairies humides jusqu'aux tourbières, qui étaient délaissées par la céréaliculture et qui ont ainsi été traditionnellement utilisées pour la pratique de la vaine pâture, le pacage du bétail ou encore pour le fauchage (CUBIZOLLE, 2019 ; JOOSTEN & CLARKE, 2002 ; MANNEVILLE *et al.*, 2006). Des indices toponymiques, archéologiques ou paléoenvironnementaux attestent de cette utilisation pastorale des zones humides, comme par exemple dans le Morvan depuis le Néolithique, dans la région Centre depuis l'âge du Fer ou encore dans les Pays-Bas depuis le Haut Moyen Âge (CUBIZOLLE, 2019 ; JOUFFROY-BAPICOT, 2010 ; MALRAIN *et al.*, 2006).

À KOH, entre 8000 et 7000 cal. BP, l'identification de spores de champignons coprophiles (*Cercophora*-type, *Sordaria*-type, *Sporormiella*-type) qui constituent des marqueurs à caractère

très local, ainsi que la présence des spores de cf. *Persiciospora* sp. (HdV 124) et du type TM 4009, qui sont deux types corrélés à un pâturage sur des tourbières riches en Cyperaceae dans l'étude menée par CUGNY (2011), témoignent de la présence de bétail pâturant probablement dans la mégaphorbiaie (Figure V.2-1). Or, ces indices sont contemporains des premières preuves de culture des céréales observées dans la séquence de KOH et attribuées au Néolithique initial (cf. V.1.1.1) et montrent donc que les populations présentes autour de la zone humide pratiquaient également une activité d'élevage.

Les premiers indices d'une utilisation anthropique des sols humides autour du site de WAL sont beaucoup plus tardifs et sont datés vers 4180 cal. BP. À partir de cette date, les pourcentages des pollens d'aulne diminuent et un pic du taux d'accumulation des macro-particules carbonisées est observé. Cependant, contrairement à ce qui est observé à KOH, cette perturbation de la végétation n'est pas liée à la présence de bétail, comme l'atteste l'absence de spores de champignons coprophiles mais est contemporaine du développement de la culture des céréales (Figure V.2-2). Les populations qui s'installent dans le bassin versant du site de WAL ont ainsi pu déboiser l'aulnaie présente sur les terrains les plus riches afin d'installer une culture de céréales, sur les zones les moins humides.

Dans les trois sites, la présence de bétail sur la tourbière est ensuite attestée par les spores de champignons coprophiles (*Cercophora*-type, *Sordaria*-type, *Sporormiella*-type, *Coniochaeta lignaria*) dont les concentrations augmentent à la fin de l'âge du Bronze (Figure V.2-1, Figure V.2-2, Figure V.2-3). Ces indices de pâturage sur les tourbières sont contemporains d'une importante modification de la végétation locale, caractérisée par la très forte régression de l'aulnaie marécageuse dans les sites de KOH et HOR et par celle du bouleau à WAL. En effet, à partir de 3190 cal. BP à HOR et 2900 cal. BP à KOH les pourcentages des pollens d'aulne chutent, suivis par la chute de ceux de tous les autres taxons de l'aulnaie (*Salix*, *Frangula*, *Betula*, Rosaceae arbres, *Lysimachia*), témoignant d'une ouverture préalable de la surface boisée de la tourbière probablement pour faciliter la circulation du bétail. De même, à WAL, les pourcentages des pollens de bouleau diminuent à partir de 2825 cal. BP. Cette ouverture anthropique des forêts humides est également attestée dans les séquences par la présence d'un pic du taux d'accumulation des macro-particules carbonisées qui révèle un événement d'incendie sur la tourbière même, probablement pour nettoyer la nouvelle surface ouverte et stimuler la pousse d'une nouvelle végétation herbacée, appétente pour le bétail

(BRIANE *et al.*, 2003). À WAL, la présence de plusieurs phases d'incendies locaux, contemporaines de la présence de bétail sur la tourbière, semble attester de feux pastoraux pratiqués sur la tourbière pour éliminer le refus issu du pâturage sélectif du bétail (BRIANE *et al.*, 2003).

De plus, l'augmentation contemporaine du taux de matière minérale dans les sédiments à HOR et KOH montre bien que la tourbière est mise à nu, ce qui favorise les apports détritiques depuis les pentes des bassins versants où des activités agro-pastorales se mettent également en place (cf. V.1.1.2 et V.1.2.1). Sur la zone humide, l'ouverture du milieu engendrent alors le développement des taxons herbacés jusqu'alors limités en sous-bois de l'aulnaie tels que les Poaceae et les Cyperaceae (essentiellement observé à HOR), dont les pourcentages polliniques augmentent, tout comme le nombre de spores de sphaignes. La diminution des pourcentages des pollens de Cyperaceae est ensuite très vite observée dans les deux sites (vers 2900 cal. BP à HOR et 2710 cal. BP à KOH) alors que ceux des Poaceae continuent d'augmenter. Cette observation peut illustrer un drainage superficiel de la tourbière qui engendre alors un développement de la molinie (Poaceae) favorisée par l'assèchement du sol ainsi que par les feux attestés par les macro-particules carbonisées. Un compactage de la tourbe dû au piétinement du bétail au cours de la phase de pâturage de la période précédente peut également être à l'origine de la diminution des Cyperaceae. Enfin, l'apport d'une quantité importante de matière minérale issue des pentes des bassins versants, attesté dans les deux sites par les analyses de perte au feu, a également pu induire un milieu défavorable aux Cyperaceae. En effet, dans le Pays de Bitche, la tourbe est souvent plus riche et moins acide que le sol forestier (surtout sous les pineraies) et les phénomènes d'érosion tendent donc à acidifier et à appauvrir la tourbe, tout en entraînant un dépôt sablonneux, ces nouvelles conditions étant défavorables au développement des Cyperaceae.

Puis, autour de 2900 cal. BP à HOR et de 2300 cal. BP à KOH, la pratique du pâturage sur la tourbière semble régresser temporairement (KOH) ou disparaître (HOR) comme l'indique la diminution des concentrations des spores de champignons coprophiles dans la tourbe alors que celles des pollens de bouleau augmentent (Figure V.2-1, Figure V.2-3).

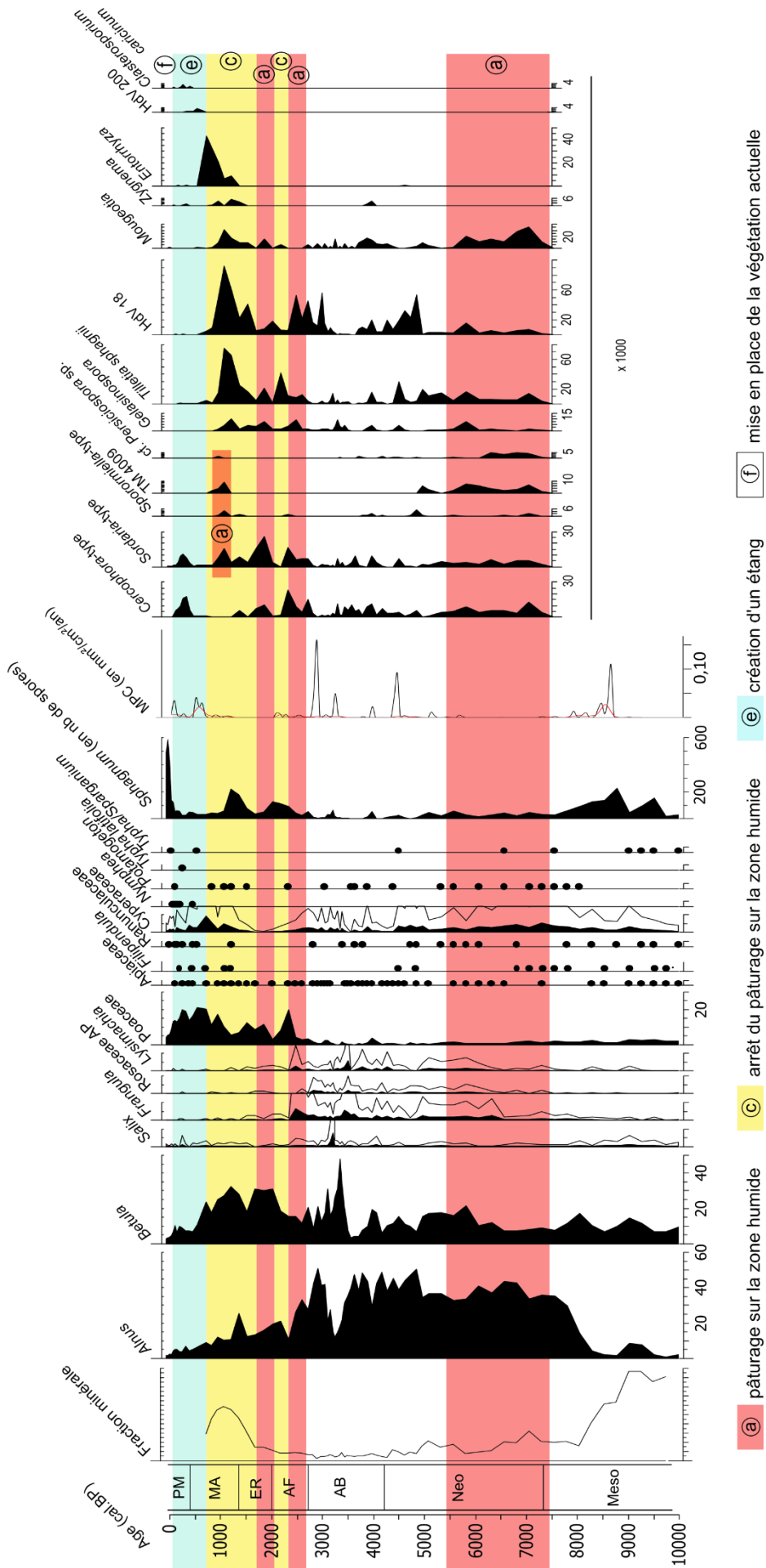


Figure V.2-1 : Diagramme simplifié de la végétation locale et des différentes phases d'activités humaines sur la zone humide de KOH. Les MNP sont présentés en nombre de spores par gramme de sédiment.

En revanche, l'exploitation de la zone humide reprend rapidement à HOR, où à partir de l'âge du Fer (vers 2450 cal. BP) les pourcentages des pollens de bouleau régressent alors que ceux des Poaceae, des Apiaceae et des Cichorioideae augmentent (Figure V.2-3). Cependant, les concentrations des spores de champignons coprophiles (*Sordaria*-type, *Cercophora*-type, *Sporormiella*-type) restent très faibles et attestent donc de la présence extrêmement réduite de bétail sur la tourbière. Ces observations supposent la mise en place de prairies de fauche sur la tourbière de HOR, probablement drainée à cette époque. Le développement des Poaceae résulte alors du maintien d'un milieu ouvert par fauchage, empêchant l'envahissement de la zone par les ligneux initialement présents et permettant la récolte du « foin de marais », traditionnellement constitué, entre autre, de molinie, de laïche ou de joncs fournissant la litière et une bonne réserve d'alimentation d'appoint pour le bétail, particulièrement appréciée lors des saisons sèches (DARINOT, 2014 ; MANNEVILLE *et al.*, 2006). Le développement des Apiaceae et des Cichorioideae indique une diversification de la végétation locale qui est cohérente avec un fauchage, qui tend à diminuer la dominance des grandes espèces de la mégaphorbiaie et engendre une grande diversité d'herbacées (BENSETTITI *et al.*, 2002 ; MANNEVILLE *et al.*, 2006). Bien que les Cichorioideae puissent être des espèces adventices ou rudérales présentes ailleurs dans le bassin versant, il peut également s'agir ici d'espèces telles que *Cirsium oleraceum* et/ou *Cirsium palustre*, ce dernier constituant un bon fourrage bien qu'il s'agisse d'une plante épineuse, ou encore *Scorzonera humilis*, présent dans les prairies à molinie des Vosges du Nord qui sont généralement issues d'une fauche extensive (FERREZ *et al.*, 2017 ; RAMEAU *et al.*, 1989).

Il semble donc qu'à partir de l'âge du Fer à HOR, l'utilisation de la tourbière en tant qu'espace de pâture ait été délaissée au profit des prairies de fauche, dont la mise en place s'inscrit dans le contexte d'intensification des activités agricoles et de transition d'un système de culture des céréales sur abattis-brûlis à un système avec jachères herbacées, observée vers 2650 cal. BP autour du site (cf. V.1.1.4). À partir de cette époque, le bétail était donc plutôt amené à la pâture sur les jachères herbacées, laissant les zones humides disponibles pour la production de litière ou de fourrage.

À KOH, après une nouvelle phase de pâturage sur la tourbière qui débute vers 2000 cal. BP, la raréfaction des spores de champignons coprophiles, accompagnée par l'augmentation des pourcentages des pollens de Poaceae et de Cyperaceae, ainsi que le retour des pollens de *Filipendula* indiquent la diminution de la pression pastorale sur la tourbière qui permet le retour d'une mégaphorbiaie (roselière ou cariçaie) à partir de 1400 cal. BP (Figure V.2-1) (BENSETTITI *et al.*, 2002). Le milieu semble également devenir plus humide comme l'atteste l'augmentation des concentrations des spores de *Mougeotia* (HdV 61), *Zygnema* (HdV 62) et d'*Entorrhiza*, probablement à cause de l'abandon du système de drainage, favorisant également le retour des Cyperaceae. Cependant, la présence de bétail semble persister localement, indiquée par l'identification des spores de *Sordaria*-type (HdV 55) et *Sporormiella*-type (HdV 113), ainsi que par l'identification des spores du type TM 4009, lié à une présence pastorale (CUGNY, 2011).

Une phase d'abandon du pâturage sur la zone humide est également perçue à WAL, à partir de 1160 cal. BP, lorsque les concentrations des spores de champignons coprophiles diminuent et que les pourcentages des pollens de Cyperaceae augmentent. À cela s'ajoute la présence de quelques pollens de *Filipendula*, indiquant la mise en place d'une mégaphorbiaie au niveau du point de prélèvement. Cependant, comme à KOH, la présence des spores du type TM 4009 est cohérente avec la mise en place d'une formation végétale humide riche en Cyperaceae et indique que la tourbière est à nouveau pâturée localement à partir de 800 cal. BP, comme le montre également le retour contemporain des spores des champignons coprophiles.

Dans ces deux sites, comme à HOR, l'arrêt du pâturage et la diminution de la pression pastorale sur la tourbière sont contemporains de la transition vers un système agraire à jachères herbacées (1450 cal. BP à KOH, 900 cal. BP à WAL), sur lesquelles le bétail semble être conduit préférentiellement, menant à un abandon de la zone humide.

Dès l'âge du Bronze, voire depuis le Néolithique à KOH, les trois tourbières du Pays de Bitche ont donc été utilisées dans le parcours du bétail par les populations s'installant dans les bassins versants des tourbières. Les races bovines de ces époques étaient très rustiques et supportaient bien les contraintes liées à la pâture sur des sols hydromorphes (enfouissement, humidité...).

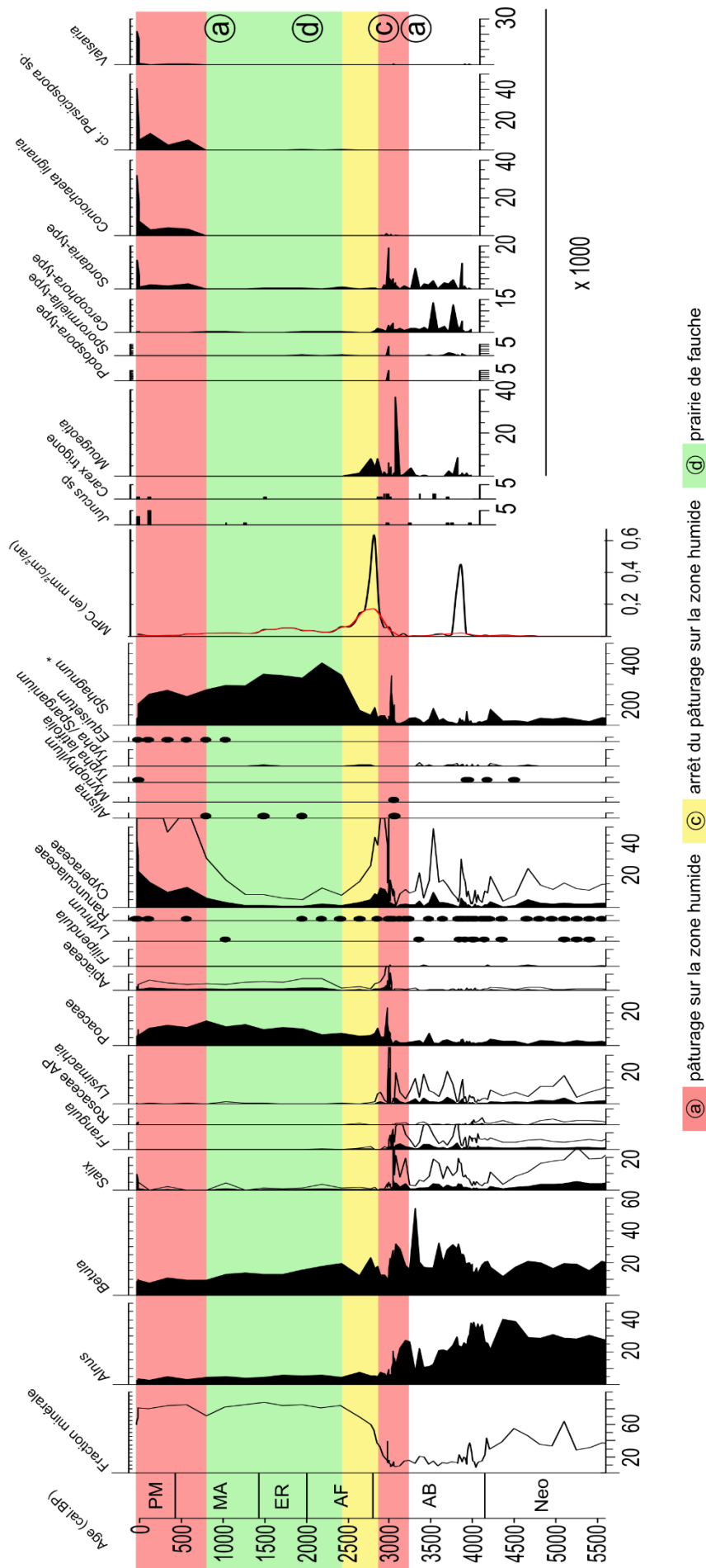


Figure V.2-3 : Diagramme simplifié de la végétation locale et des différentes phases d'activités humaines sur la zone humide de HOR. Les MNP sont présentés en nombre de spores par gramme de sédiment.

En plus du pâturage, les zones humides ont également fait l'objet d'une valorisation agricole en lien avec le pastoralisme, en offrant un milieu de choix pour la mise en place de prairies de fauche. La mise en place de cette pratique perçue à HOR est cohérente avec les connaissances disponibles sur cette tourbière qui a été asséchée via la création de fossés de drainage afin d'être utilisée comme terrain de fauche, probablement jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale. De plus, les données historiques témoignent de l'intérêt pour les zones humides comme l'atteste la transformation d'étang en prairies, par assèchement, dès le XVII^{ème} siècle dans les Vosges du Nord et la présence au XVIII^{ème} siècle de prairies de fauche dans les vallées à fonds plats (JEHIN, 2006b, 2005 ; ROCHEL, 2004). Avec la phase de croissance démographique du XVIII^{ème} siècle, les paysans étendent leur emprise aux zones humides (cf I.2.3.3) qui constituent des terres assez fertiles pour être transformées en prés avec la mise en place d'un système de drainage. D'ailleurs, les traces de ces systèmes de drainage subsistent encore dans les Vosges du Nord de nos jours (DUCHAMP, 2009).

Au Moyen Âge, une autre pratique voit le jour et impacte très fortement les zones humides : la création d'étangs à vocation piscicole.

V.2.2. Construction des étangs au Moyen Âge

Dans la tourbière de Waldeck, une nouvelle modification de la végétation locale est observée à partir de 620 cal. BP (1330 cal. AD), avec l'apparition et l'augmentation des pourcentages des plantes aquatiques (*Nymphaea*, *Potamogeton*, *Typha latifolia* et *Myriophyllum*) qui indique une augmentation du niveau d'eau et la création d'un étang. Une augmentation des teneurs en silice biogène, traduites par une augmentation du rapport Si/Ti, et une présence plus importante de diatomées sont contemporaines de l'augmentation du niveau d'eau. Bien qu'elles soient observées dans la tourbe à partir de 1350 cal. BP, une estimation de la présence des diatomées a montré qu'elles sont plus abondantes à partir du développement des taxons aquatiques. Une identification sommaire a permis de reconnaître les genres *Tabellaria*, *Stauroneis*, *Pinnularia*, *Eunotia*, *Anomoeoneis*, *Aulacoseira* et *Frustulia* alors qu'à la base de la séquence seuls les genres *Pinnularia*, *Anomoeoneis* et *Eunotia* étaient identifiés et que le genre *Fragilaria* présent sporadiquement le long de la séquence, disparaît des niveaux supérieurs (FIGUS, 2018). Cependant, sans une identification poussée au rang de l'espèce, il est difficile de déduire si ces diatomées signent une augmentation du niveau d'eau,

même si la diversification des genres observés dans la tourbe semble indiquer la mise en place de conditions écologiques moins restrictives que celles des tourbières (SERIEYSSOL *et al.*, 2011). En revanche, l'assemblage des microfossiles non-polliniques indique une perturbation car les concentrations des spores de tous les types identifiés chutent lorsque les taxons aquatiques apparaissent. La raréfaction des spores de *Tilletia sphagnii* (HdV 27), parasite de *Sphagnum*, de celles du type HdV 18, poussant sur *Eriophorum vaginatum* et la diminution progressive des concentrations des spores du type TM 4009, trouvé préférentiellement dans les pelouses humides à marécageuses, indiquent que les conditions ne sont plus favorables au développement de ces plantes et de ces formations végétales, le niveau d'eau étant alors trop haut.

De même, la quasi-disparition des spores de champignons coprophiles (*Sordaria*-type, *Cercophora*-type, *Coniochaeta lignaria*) ainsi que la diminution des pourcentages des pollens de Cyperaceae et de Poaceae indiquent bien que la zone n'est plus utilisée pour le pâturage et n'est plus favorable au développement des formations telles que les roselières, les cariçaies ou la mégaphorbiaie. En revanche, un pic des concentrations des spores de *Mougeotia* (HdV 61) montre bien qu'un milieu en eau est présent. L'analyse des carporestes a mis en évidence la présence de restes de graines de *Juncus* sp., contemporaine de l'apparition des taxons aquatiques, celui-ci se développant sur les berges de l'étang, tout comme les laïches, dont les graines sont également identifiées.

Ces observations attestent donc de la création de l'étang de Waldeck au XIV^{ème} siècle, par la construction d'une digue, en aval du point de prélèvement, afin d'augmenter le niveau d'eau de la tourbière préexistante. Cet étang, dont la création était supposée dater du XVIII^{ème} siècle, a donc été créé au XIV^{ème} siècle. Cependant, comme il était utilisé pour la pisciculture, il a pu être vidangé et mis en assec pendant quelques temps et donc ne pas être représenté sur les cartes anciennes.

La tourbière de KOH montre également un retour des plantes aquatiques (*Nymphaea*, *Typha latifolia*, *Typha/Sparganium*) à partir de 700 cal. BP (1250 cal. AD), qui témoigne d'une augmentation du niveau d'eau qui peut, là aussi, correspondre à la création de l'étang de Kobert-Haut, suite à la construction d'une digue sur le ruisseau du Neudoerferbach, en aval du point de prélèvement. Comme à WAL, la disparition des spores de *Tilletia sphagnii* (HdV 27), de celles du type HdV 18 ainsi que de celles du type TM 4009 montrent que l'on ne se trouve

plus dans une formation herbacée liée aux zones humides. À l'inverse, l'apparition des spores du type HdV 200 indiquerait des phases d'assèchement temporaires faisant suite à des phases aquatiques, qui serait cohérentes avec les vidanges des étangs utilisés pour la pisciculture (CUGNY, 2011).

V.2.3. Mise en place de la végétation actuelle des zones humides

Le sommet des séquences permet d'observer la mise en place de la végétation locale actuelle. Ainsi, à WAL, les taxons aquatiques se raréfient à partir de 480 cal. BP, indiquant que le niveau d'eau baisse au point de prélèvement. La présence de carporestes de *Carex* sp dans la tourbe et l'augmentation du nombre de spores de sphaignes jusqu'à 275 cal. BP, accompagnées par les spores de *Tilletia sphagnii* (HdV 27), indiquent probablement la mise en place des gazons à *Carex* et sphaignes qui sont observées actuellement à proximité du point de prélèvement. La présence de pollens de *Drosera*, identifiés à partir de 360 cal. BP et l'identification de restes de graines de *Rhynchospora alba* à partir de 235 cal. BP indiquent la mise en place de la communauté végétale des tourbes et des sables humides, ouverts et acides, également visible de nos jours autour de l'étang de Waldeck. L'apparition de ces différentes végétations, alors que les plantes aquatiques sont en recul, témoigne de la dynamique d'atterrissement que subit aujourd'hui encore l'étang de Waldeck. En revanche, les concentrations des spores d'*Entorrhiza* augmentent au sommet de la séquence, indiquant que le milieu reste toujours très humide.

À partir de 230 cal. BP, une explosion du nombre des spores de sphaigne est observée dans la séquence de KOH. Ce fort développement peut être relié à un processus d'atterrissement puis à la mise en place des formations de tourbière haute en voie d'assèchement, fauchée ou brûlée (type d'habitat EUNIS D1.121), dominée par la molinie pourpre (*Molinia caerulea*) et accompagnée de communautés de sphaignes papilleuses (*Sphagnum papillosum*).

Enfin, dans l'enregistrement de HOR, la constitution des cariçaies actuelles, qui ont été entretenues par fauchage jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle, est marquée par une importante augmentation des pourcentages des pollens de Cyperaceae à partir de 100 cal. BP (1850 cal. BP), qui s'accroît ensuite vers -27 cal. BP (1977). L'augmentation des concentrations des spores de *Sordaria*-type (HdV 55) et de *Coniochaeta lignaria* (HdV 172) atteste également le retour du bétail sur la tourbière à partir de 650 cal. BP. De même, l'augmentation des

concentrations des spores de cf. *Persiciospora* sp. (HdV 124) à la même date, confirme que la végétation de la tourbière est dominée par les Cyperaceae et que celle-ci est intensivement pâturée. De plus, le type HdV 124 indique également un milieu mésotrophe et l'augmentation des concentrations des spores de *Valsaria* (HdV 140), qui a la particularité d'être présent dans les milieux tourbeux eutrophes, indique que le milieu tourbeux s'enrichit en éléments nutritifs au sommet de la séquence.

En résumé, les tourbières du Pays de Bitche ont ainsi été utilisées depuis le Néolithique par les populations locales, principalement pour les activités liées à l'élevage et au Moyen Âge pour la pisciculture. Ces activités ont engendré des modifications importantes de la végétation locale et notamment leur déboisement. Cependant, l'utilisation des tourbières est entrecoupée de phases d'abandon permettant la reprise d'une dynamique naturelle, notamment dans les sites de WAL et KOH.

Chapitre VI.

Reconstitution de l'impact environnemental des sociétés humaines du Pays de Bitche du Mésolithique à nos jours



*Bitche
Carte de Cassini
(XVIIIème siècle)*



*Bitche
Carte de l'état-major
(XIXème siècle)*



*Bitche
Photographie aérienne
(XXème siècle)*



*Bitche
Photographie aérienne
(XXIème siècle)*

VI.1. Évolution de l'utilisation du paysage du Pays de Bitche du Néolithique à nos jours

Les résultats de l'analyse multi-proxy ont permis d'identifier les différentes pratiques humaines qui se sont succédées au cours du temps dans le Pays de Bitche et de percevoir leurs impacts, aussi bien à l'échelle du bassin versant qu'à l'échelle de la zone humide. En croisant les différents indicateurs, nous avons pu mettre en évidence des impacts aussi bien sur la végétation, et à une échelle plus large sur les paysages, que sur les sols ou encore sur les conditions hydriques des zones humides.

Le tableau VI.1-1 présente les différentes activités et pratiques identifiées dans les trois sites aux différentes époques et résume les principaux indices qui ont permis de les mettre en évidence.

De manière générale, malgré l'absence d'une étude de pluie pollinique actuelle dans la région d'étude, l'utilisation des principaux taxons polliniques couramment utilisés en palynologie comme marqueur de cultures des céréales ou de pastoralisme s'est avérée satisfaisante, ceux-ci étant bien corrélés à la présence des céréales et du bétail, indiquée par les spores de champignons coprophiles. De plus, sur les sols pauvres et acides du Pays de Bitche, la callune est apparue comme un indicateur intéressant de la plupart des formations végétales, liées aux activités humaines.

La comparaison des données polliniques avec les données écologiques modernes et avec la caractérisation botanique des milieux actuels a aidé à l'identification des formations végétales passées, identifiées dans nos diagrammes, comme les landes à callune ou les prairies pâturées par exemple. De plus, l'utilisation des données historiques et des études géohistoriques a également permis d'interpréter les résultats en donnant des informations sur des pratiques anciennes et abandonnées de nos jours, comme la pâture en forêt ou la grasse pâture.

De manière générale, l'étude multi-proxy des trois séquences a permis de mettre en évidence un impact anthropique croissant sur le paysage du Pays de Bitche, du Néolithique au Moyen Âge. Trois périodes particulières ont été mises en évidence dans l'histoire des pratiques : l'âge du Fer, le Moyen Âge et l'époque moderne.

Tableau VI.1-1 : Tableau résumant les différentes pratiques identifiées dans les sites du Pays de Bitche, les indices paléoécologiques les caractérisant ainsi que leur période d'apparition et leur impact sur le paysage.

	Pratiques	Indices paléoécologiques	Périodes	Impact sur le paysage
Pratiques agraires	Culture sur abattis-brûlés	<ul style="list-style-type: none"> - ↑ céréales - ↑ μPC - oscillation des AP - ↑ <i>Calluna</i> - ↑ <i>Melampyrum</i> - ↑ IPA (<i>Papaver, Artemisia...</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ouest du pays couvert: du Néolithique à l' Âge du Fer puis à partir du Bas Moyen Âge - Est du pays couvert: du Néolithique au Moyen Âge puis à partir de la fin du Moyen Âge 	<ul style="list-style-type: none"> - impact faible : culture itinérante et temporaire, clairière restreinte - ouverture temporaire - forêt résiliente
	Système à jachères herbacées	<ul style="list-style-type: none"> - ↑ céréales - ↑ μPC - ↓ AP - ↑ <i>Calluna</i> - ↑ IPA (<i>Plantago lanceolata, Rumex, Cichorioideae...</i>) - ↑ spores trilètes 	<ul style="list-style-type: none"> - Ouest du pays couvert : à partir de l' Âge du Fer - Est du pays couvert : à partir du Moyen Âge Central 	<ul style="list-style-type: none"> - ouverture importante et permanente - Apparition des landes à callune - érosion des sols - légère perte de résilience de la forêt
Pratiques pastorales	Vaine pâture en forêt	<ul style="list-style-type: none"> - ↑ NAP (<i>Poaceae, Calluna</i>) - ↑ spores trilètes - ↓ AP - ↑ μPC - ↑ IPA (<i>Plantago lanceolata, Urticaceae, Rumex...</i>) 	À partir de l' Âge du Fer	<ul style="list-style-type: none"> - « dent du bétail » - morcellement du couvert forestier - trouées et landes à callune - Feux pastoraux - Incendies accidentels
	Vaine pâture non boisée	<ul style="list-style-type: none"> - ↑ NAP (<i>Poaceae, Calluna</i>) - ↓ AP - ↑ IPA (<i>Plantago lanceolata, Urticaceae, Rumex...</i>) - SCC 	À partir de l' Âge du Fer	<ul style="list-style-type: none"> - maintien le milieu ouvert - transfert de fertilité vers les champs
	Grasse pâture	<ul style="list-style-type: none"> - ↑ chêne - indices de la vaine pâture en forêt 	<ul style="list-style-type: none"> - Ouest du pays couvert : à partir de l' Âge du Bronze - Est du pays couvert : à partir de l' Âge du Fer 	<ul style="list-style-type: none"> - modification de la composition forestière
	Prairies de fauche	<ul style="list-style-type: none"> - ↑ NAP - ↓ AP Sur zones humides: <ul style="list-style-type: none"> - ↓ bouleau - ↑ <i>Poaceae, Apiaceae, Cichorioideae</i> - ↓ SCC 	À partir de l'Âge du Fer	<ul style="list-style-type: none"> - maintien le milieu ouvert - augmentation de la diversité floristique - Sur zones humides: modification hydrique, drainage
	Pâturage sur la zone humide	<ul style="list-style-type: none"> - ↓ aulnaie ou ↓ boulaie - ↑ <i>Poaceae</i> - ↑ SCC - ↑ MPC 	Depuis le Néolithique, différentes phases identifiées en fonction des sites	<ul style="list-style-type: none"> - déboisement de l'aulnaie marécageuse - piétinement de la zone humide
Pisciculture		<ul style="list-style-type: none"> - ↑ taxons aquatiques - ↑ <i>Juncus</i> sp. 	Au Moyen Âge	<ul style="list-style-type: none"> - modification importante de la végétation locale - Modification du niveau d'eau : digue
Industries	Métallurgie	<ul style="list-style-type: none"> - Apports anthropiques d'éléments métalliques (Pb, Cu, Zn, Ni, Fe) - ↓ AP 	À partir de l'Âge du Bronze	<ul style="list-style-type: none"> - Ouverture du milieu - Gestion de la forêt

C'est à partir du Mésolithique, autour de 6100 cal. BC que les premiers indices d'un impact anthropique sont identifiés sur les forêts, principalement composées de chênaies diversifiées dans lesquelles le pin reste bien présent. Au cours du Néolithique et de l'âge du Bronze, les principales activités exercées par les populations locales sont celles assurant leur subsistance, à savoir la culture des céréales et l'élevage (Figure VI.1-1). Le système de culture est alors un système itinérant sur abattis-brûlis et les activités d'élevage sont réduites à un pâturage sur les zones humides, bien qu'à l'ouest du pays couvert les forêts semblent déjà utilisées pour la grasse pâture, au cours de l'âge du Bronze (Figure VI.1-1). C'est également de cette dernière époque, au II^{ème} millénaire avant notre ère, que datent les plus anciens indices d'une activité métallurgique dans le Pays de Bitche.

Au cours de ces périodes, la forêt subit ses premiers dommages et s'ouvre régulièrement. Cependant, la culture itinérante n'induit que des ouvertures temporaires qui permettent à la forêt de rester résiliente, car chaque arrêt des cultures entraîne une recolonisation forestière, lors de laquelle les pourcentages de pollens d'arbres retrouvent leurs valeurs antérieures à la perturbation.

La période suivante, l'âge du Fer, est marquée par une très forte intensification et une diversification des pratiques agropastorales dans tout le Pays de Bitche, alors que les activités métallurgiques sont toujours attestées (Figure VI.1-1). À cette époque, vers 2650 cal. BP (700 cal. BC), le système itinérant de culture des céréales sur abattis-brûlis est remplacé dans l'ouest du pays couvert par un système à jachères herbacées. Cette évolution du système agraire dans le Pays de Bitche est cohérente avec la révolution agricole de l'Antiquité, observée en Europe dès l'âge du Bronze et jusqu'à l'âge du Fer, lorsque le système agro-forestier est progressivement remplacé par un système de céréaliculture intensif avec la mise en place de parcelles et d'un système de jachères (CAROZZA & MARCIGNY, 2007 ; MAZOYER & ROUDART, 2002). De plus, cette révolution agricole engendre également l'organisation du territoire en trois parties distinctes – l'*ager* (les zones de culture), le *saltus* (dédié au pâturage) et la *sylva* (la forêt) – qui composent alors un paysage anthropisé où chaque partie est largement exploitée (CAROZZA & MARCIGNY, 2007 ; MAZOYER & ROUDART, 2002). Dans le Pays de Bitche, de nouvelles pratiques se développent alors, engendrant une utilisation extensive du paysage. Les forêts deviennent le lieu privilégié du pâturage, alors que de nouvelles formations herbacées sont également ouvertes pour la pâture ou la fauche (Figure VI.1-1).

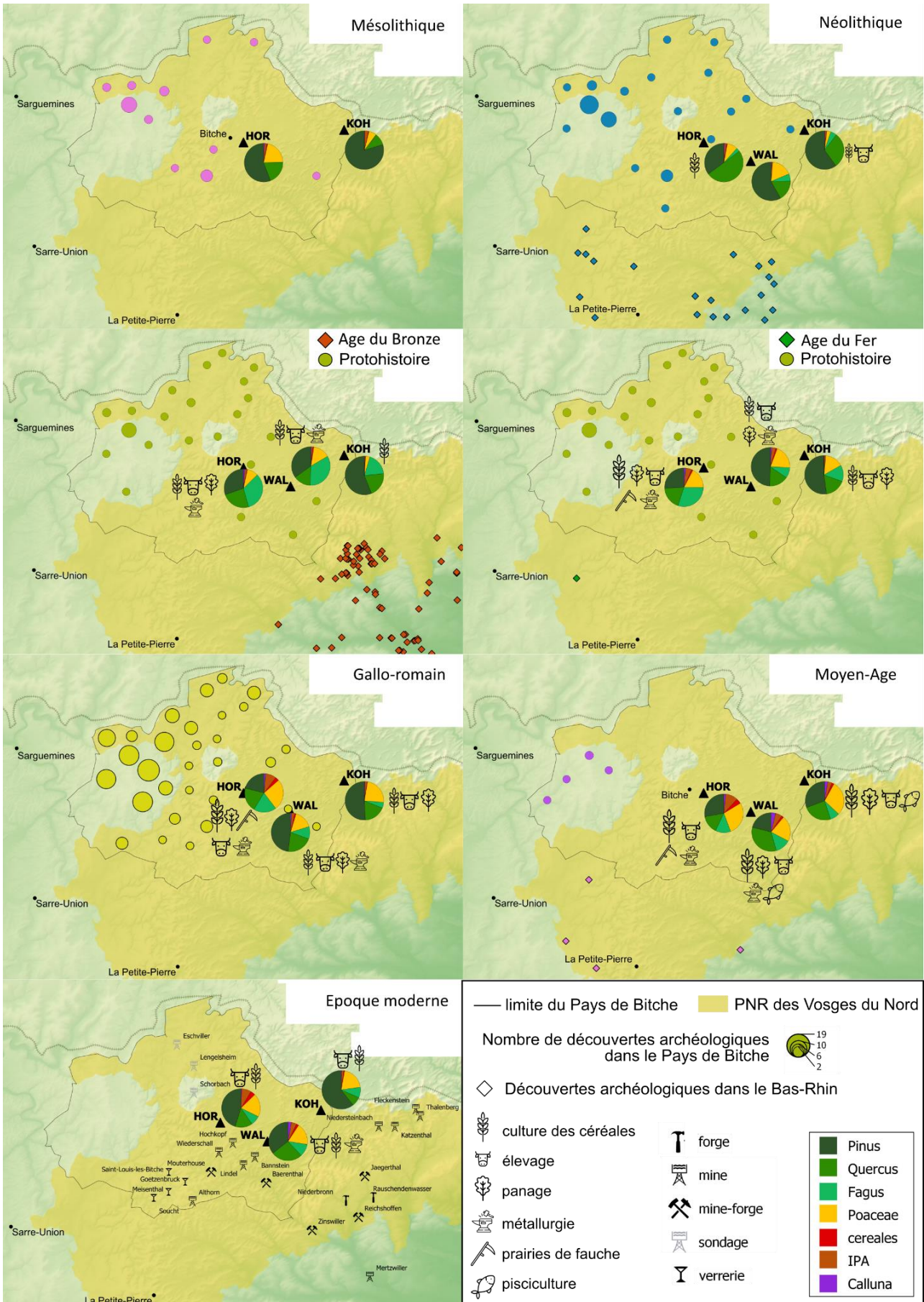


Figure VI.1-1 : Figure de synthèse de l'histoire des activités humaines dans le Pays de Bitche du Mésolithique à nos jours (auteur : E.Gouriveau, source : BD ALTIV2 ©IGN, Carte géologique 1/50000 format "vecteur", ©BRGM, 2004, SCHMIT *et al.*, 2017)

Ce nouveau système agropastoral impacte fortement les forêts qui sont fragmentées par les nouvelles pratiques et régressent alors progressivement et de manière continue, d'autant plus qu'elles sont également exploitées pour alimenter les mines et les forges (Figure VI.1-1). Les forêts perdent ainsi de leur résilience, ne retrouvant plus leurs pourcentages d'origine lors des phases de diminution de la pression anthropique.

La période romaine dans le Pays de Bitche est dans la continuité des époques précédentes et toutes les activités agro-pastorales mises en place à l'âge du Fer se poursuivent sans intensification ou modification de l'utilisation du paysage (Figure VI.1-1). En revanche, les activités métallurgiques s'intensifient dans la région.

Le Moyen Âge constitue la deuxième période d'intensification de l'utilisation du paysage et de ces impacts (Figure VI.1-1). La céréaliculture se diversifie avec la culture du seigle et, dans l'est du pays couvert, le passage à un système agraire à jachères herbacées a lieu. Cette intensification est cohérente avec la révolution agricole du Moyen Âge qui donne lieu à de nombreuses innovations dans les techniques agricoles (rotation triennale, stabulation, foin, fumier...) et dans l'outillage (charrue, faux, chariot, ...) (MAZOYER & ROUDART, 2002).

D'après GARNIER (2018), cette révolution engendre alors une nouvelle organisation de l'écosystème cultivé qui accentue l'impact sur les forêts, comme l'illustrent nos données du Pays de Bitche (Figure VI.1-1). De manière générale, les nombreuses activités des populations du Pays de Bitche nécessitent l'exploitation de la forêt, que ce soit pour se fournir en bois et produire du charbon de bois, sources principales d'énergie ou de matériau de construction, pour utiliser ses nombreuses ressources (grasse pâture, chasse, cueillette...) ou pour ouvrir de nouveaux espaces de culture. Cette importante exploitation de la forêt atteint une intensité inédite qui se manifeste alors par l'ouverture maximale des forêts aux XII^{ème} et XIV^{ème} siècles. De plus, le pâturage sous forêt et la pratique de la grasse pâture s'intensifient et engendrent progressivement une modification de la composition des forêts au sein desquelles le chêne prend une place particulière par rapport aux essences spontanément plus compétitives comme le hêtre. Des étangs piscicoles sont également créés à cette époque par élévation du niveau d'eau des zones humides préexistantes, illustrant une nouvelle pratique humaine qui a fortement perturbé la végétation locale.

À partir du milieu du Moyen Âge Central/fin du Bas Moyen Âge, l'utilisation du paysage change à nouveau dans le Pays de Bitche. La culture du seigle est délaissée au profit d'autres

céréales et le système agraire retourne à une culture à jachères longues, permettant le retour des arbres (surtout le pin) sur les parcelles agricoles abandonnées. De plus, les pratiques de la vaine et de la grasse pâture en forêt sont abandonnées ou très réduites, permettant là encore le retour d'un plus important couvert forestier. Le chêne n'est alors plus maintenu préférentiellement, ce qui engendre un nouveau changement de la composition forestière, qui est alors à nouveau dominée par le pin.

Enfin, l'époque moderne constitue une période de modification radicale de l'utilisation du paysage. En effet, à cette époque, la pression agropastorale est réduite et beaucoup de pratiques sont abandonnées ou occasionnelles (Figure VI.1-1). Seules persistent une culture très limitée des céréales et un élevage également très réduit.

À l'inverse, les activités métallurgiques connaissent un important développement à partir du XVI^{ème} siècle et les forêts sont exploitées pour le bois de feu et la production de charbon de bois. Cependant, les arbres continuent de revenir autour des sites (Figure VI.1-1), et ce retour met en évidence, d'une part, une politique de gestion des forêts (règlement général de 1701, interdiction des défrichements en 1724), et d'autre part, le développement de la sylviculture au XIX^{ème} siècle et le début des grandes plantations de conifères, menant à l'important taux de boisement actuel du massif des Vosges du Nord.

VI.2. Apport à la connaissance de l'histoire du Pays de Bitche et intégration dans le contexte régional

Cette partie vise à souligner l'apport de l'analyse multi-proxy menée dans le Pays de Bitche à la connaissance de l'histoire de la région et de ses populations. Nous avons vu au chapitre I.2 que les données archéologiques sont peu nombreuses et fragmentaires, essentiellement pour le pays couvert. Il est donc intéressant de croiser les différentes données afin de comprendre si leur rareté dans cette région est due à une faible présence humaine pour les périodes les plus anciennes ou si elle résulte d'un manque de prospections et de fouilles archéologiques, notamment sous le dense couvert forestier, ou encore d'une mauvaise conservation des vestiges. De plus, il est intéressant d'appréhender la réponse des sociétés face à certains événements historiques ou climatiques et de visualiser leur impact sur le paysage. Pour chaque période, les observations du Pays de Bitche seront également replacées

dans le contexte régional afin de mettre en évidence les particularités de l'anthropisation de notre région d'étude.

VI.2.1. Du Mésolithique à l'âge des Métaux

Bien que la présence de groupes de chasseurs-cueilleurs soit attestée au Mésolithique par la découverte d'outillage lithique sur plusieurs communes du Pays de Bitche, ces populations n'impactent pas le paysage qui reste extrêmement boisé (Figure VI.1-1).

Les premiers grains de pollen de *Cerealia*-type, identifiés dans les séquences du Pays de Bitche, remontent au Mésolithique. Comme nous l'avons vu, les plus anciens pollens de *Cerealia*-type sont difficiles à interpréter mais les indices d'une présence humaine se font plus nombreux à partir de 8120 cal. BP (i.e 6170 cal. BC) à HOR et de 8530 cal. BP (6580 cal. BP) à KOH avec, aux côtés des pollens de *Cerealia*-type, des pollens de *Papaver* et une ouverture du milieu forestier.

Ces indices sont cohérents avec des indices polliniques identifiés dans de nombreuses séquences d'Europe Centrale (Suisse, Allemagne, Autriche), de l'Ouest (ouest de la France), du Sud (nord de l'Italie, sud de la France) et du Nord (Iles Britanniques, Scandinavie) (BEHRE, 2007 ; JEUNESSE, 2003 ; TINNER *et al.*, 2007) (Figure VI.2-1). Les plus anciens pollens de *Cerealia*-type sont identifiés en Suisse autour de 7775 cal. BC (Soppensee, TINNER *et al.*, 2007), alors que la grande majorité des indices polliniques sont datées entre 6800 et 5500 cal. BC pour l'ensemble de l'Europe. Bien que les grains de pollen de *Cerealia*-type identifiés dans des niveaux antérieurs au Mésolithique récent (6700-5500 cal. BC) ne soient pas interprétés comme des indices d'une possible agriculture mésolithique, ceux découverts entre 6700 et 5500 cal. BC, le sont dans de nombreuses études, où ils sont souvent accompagnés d'autres indices polliniques d'anthropisation, tels que *Plantago lanceolata*, *Rumex*, *Urtica* ou encore par des pics de charbons de bois (BEHRE, 2007 ; TINNER *et al.*, 2007).

Les premiers indices d'une présence humaine dans les Vosges du Nord, autour de 6600-6200 cal. BC, sont donc dans la continuité géographique et chronologique des autres indices connus en Europe.

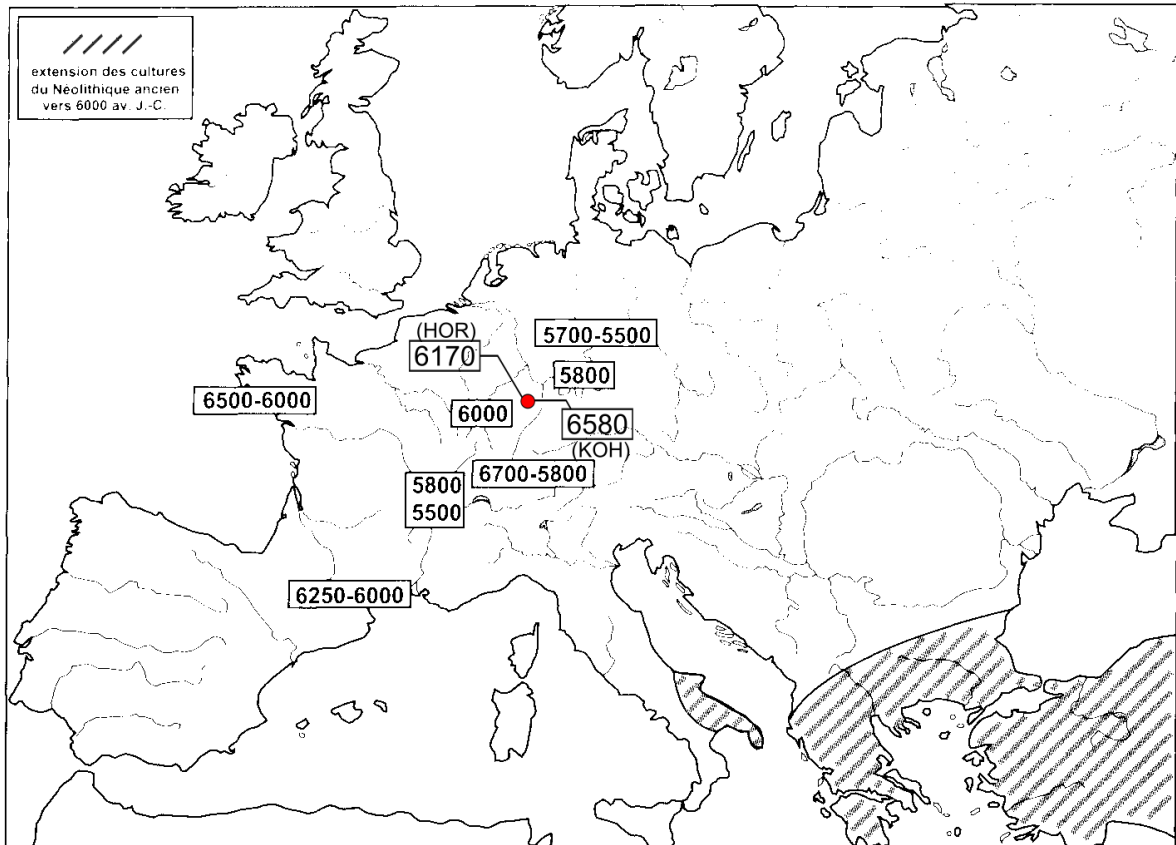


Figure VI.2-1 : Intégration des premiers indices d'agriculture du Pays de Bitche dans le phénomène d'agriculture précoce (modifié d'après JEUNESSE, 2003)

Bien qu'il faille considérer avec prudence ces indices, dont l'origine anthropique ne peut être affirmée au vu, d'une part, des difficultés d'identification du type *Cerealia* et, d'autre part, du statut indigène des IPA pris en compte (*Plantago lanceolata*, *Rumex*, *Urtica*) (BEHRE, 2007), leur présence dans de nombreuses séquences pose question et leur interprétation est d'une grande importance dans la compréhension des processus de néolithisation de l'Europe (TINNER *et al.*, 2007). Plusieurs hypothèses sont proposées quant à l'existence d'une possible culture des céréales au Mésolithique récent. Certains auteurs proposent une culture des céréales restreinte et temporaire, pratiquée par des populations mésolithiques indigènes gardant principalement un mode de vie chasseur-cueilleur nomade, mais pratiquant tout de même une culture marginale des céréales, que certains auteurs qualifient d' « horticulture » (GRONENBORN, 2003 : 82 : *small-scale horticulture*, *forager-horticulturists*, 85 : *cereal horticulture*) (GRONENBORN, 2003 ; JEUNESSE, 2003 ; MANEN & MAZURIE DE KEROUAIN, 2003 ; TINNER *et al.*, 2007). Contrairement aux populations danubiennes qui concentraient principalement leur habitat et leurs cultures sur les sols fertiles des régions loessiques, il est intéressant de noter que les indices polliniques mésolithiques se répartissent dans de

nombreuses régions, indépendamment des conditions de fertilité du sol, comme c'est le cas dans les Vosges du Nord (JEUNESSE, 2003).

Ces céréales mésolithiques auraient pu être acquises par contact avec les populations néolithiques de Méditerranée occidentale (GRONENBORN, 2003 ; JEUNESSE, 2003 ; MANEN & MAZURIE DE KEROULAIN, 2003 ; TINNER *et al.*, 2007). L'existence de contacts entre la Méditerranée et l'Europe Centrale a été mise en évidence par l'importation de coquillages méditerranéens jusqu'en Allemagne dès le Mésolithique (MANEN & MAZURIE DE KEROULAIN, 2003 ; TINNER *et al.*, 2007). De même, la céramique de type La Hoguette, dont l'apparition serait datée autour de 5800 av. J.-C., soit antérieure au Néolithique danubien, possède un style inspiré du Néolithique ancien de la Méditerranée occidentale, alors que son aire de répartition s'étend dans l'est de la France et en Allemagne du Sud-Ouest, le long de la vallée du Neckar et de la plaine du Rhin supérieur, soit dans la région de nos sites d'étude (JEUNESSE, 2003 ; MANEN & MAZURIE DE KEROULAIN, 2003 ; TINNER *et al.*, 2007).

Même si les découvertes archéologiques du Mésolithique sont assez fragmentaires dans les Vosges du Nord et dans le Pays de Bitche, elles laissent, tout de même, supposer l'existence de « deux [...] « camps de base » et occupations durables » dans des communes du pays couvert (Schmit et al., 2017 : 26).

Sans un contexte archéologique mésolithique solide et sans la découverte de grains de céréales carbonisées mésolithiques, l'hypothèse d'une agriculture mésolithique ne peut être affirmée (Behre 2007). Cependant, les indices polliniques et archéologiques qui se multiplient dans de nombreuses régions semblent indiquer que la période de la seconde moitié du VII^{ème} millénaire au IV^{ème} millénaire avant notre ère constitue une période de transition du mode de vie chasseur-cueilleur au mode de vie agriculteur, pendant laquelle de nombreux contacts entre les différentes cultures ont induit une diffusion des techniques et l'apparition de modes de vie intermédiaires (GRONENBORN, 2007, 2003 ; JEUNESSE, 2003 ; MANEN & MAZURIE DE KEROULAIN, 2003 ; TINNER *et al.*, 2007).

Au Néolithique et à l'âge du Bronze, les découvertes archéologiques se multiplient dans le Pays de Bitche, mais essentiellement dans le pays découvert (Figure VI.1-1). La présence de cultures de céréales identifiées au Néolithique dans nos enregistrements est cohérente avec la découverte de faucilles et de meules dans le pays découvert, attestant bien de la présence

d'agriculteurs dans la région. La rareté des découvertes archéologiques de l'âge du Bronze est assez cohérente avec les faibles impacts temporaires perçus sur le paysage.

Nos données soulignent ici une lacune dans les données archéologiques du pays couvert. En effet, alors que les découvertes sont extrêmement rares dans cette région, nos données indiquent que de petites communautés d'agriculteurs-éleveurs étaient établies au cours de ces deux époques dans la région, principalement autour de Bitche.

L'âge du Bronze constitue une première période d'augmentation modérée de l'impact humain dans de nombreuses régions, qui enregistrent les premiers défrichements, comme par exemple en Forêt Noire ou dans les Vosges cristallines, où l'ouverture des Hautes-Chaumes est attestée à partir de cette époque (GOEPP *et al.*, 2007 ; MÄCKEL *et al.*, 2009 ; RÖSCH, 2000 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015).

La transition de l'âge du Bronze à l'âge du Fer, entre 2800 et 2650 cal. BP (soit entre 850 et 700 cal. BC), est marquée par la péjoration climatique de l'Hallstatt, ou « événement de 850 cal. BC », qui est caractérisée par un climat froid et humide dans l'hémisphère nord et qui entraîne un abandon des pratiques agropastorales dans le Pays de Bitche et un retour de la forêt (Figure VI.2-4, Figure VI.2-3) (VAN GEEL *et al.*, 1998 ; WANG *et al.*, 2012 ; ZOLITSCHKA *et al.*, 2003). Dans ce contexte, les « cuvettes » du Pays de Bitche ont sûrement subi un climat très rude, défavorable à la culture des céréales, obligeant les populations à se tourner essentiellement vers l'élevage ou à quitter les fonds humides des cuvettes. Cette phase de déprise est régionale car une propagation des forêts sur les champs et les labours abandonnés a également été enregistrée dans la région du Rhin Supérieur (MÄCKEL *et al.*, 2009).

Par la suite, nos données montrent que l'âge du Fer est une période de très forte intensification et de diversification des pratiques agropastorales dans tout le Pays de Bitche. Les données archéologiques vont également dans ce sens. Celles-ci sont en effet plus abondantes qu'à la période précédente et c'est de cette période que sont datés plusieurs sites de hauteur du pays couvert. Rappelons que l'un d'eux, le Ring d'Haspelschiedt (à 4 km du site de HOR) est construit au second âge du Fer, alors que nos données attestent d'un fort développement agropastoral autour de la tourbière de La Horn. Ces observations semblent indiquer que le Ring ait été un pôle important dans cette région.

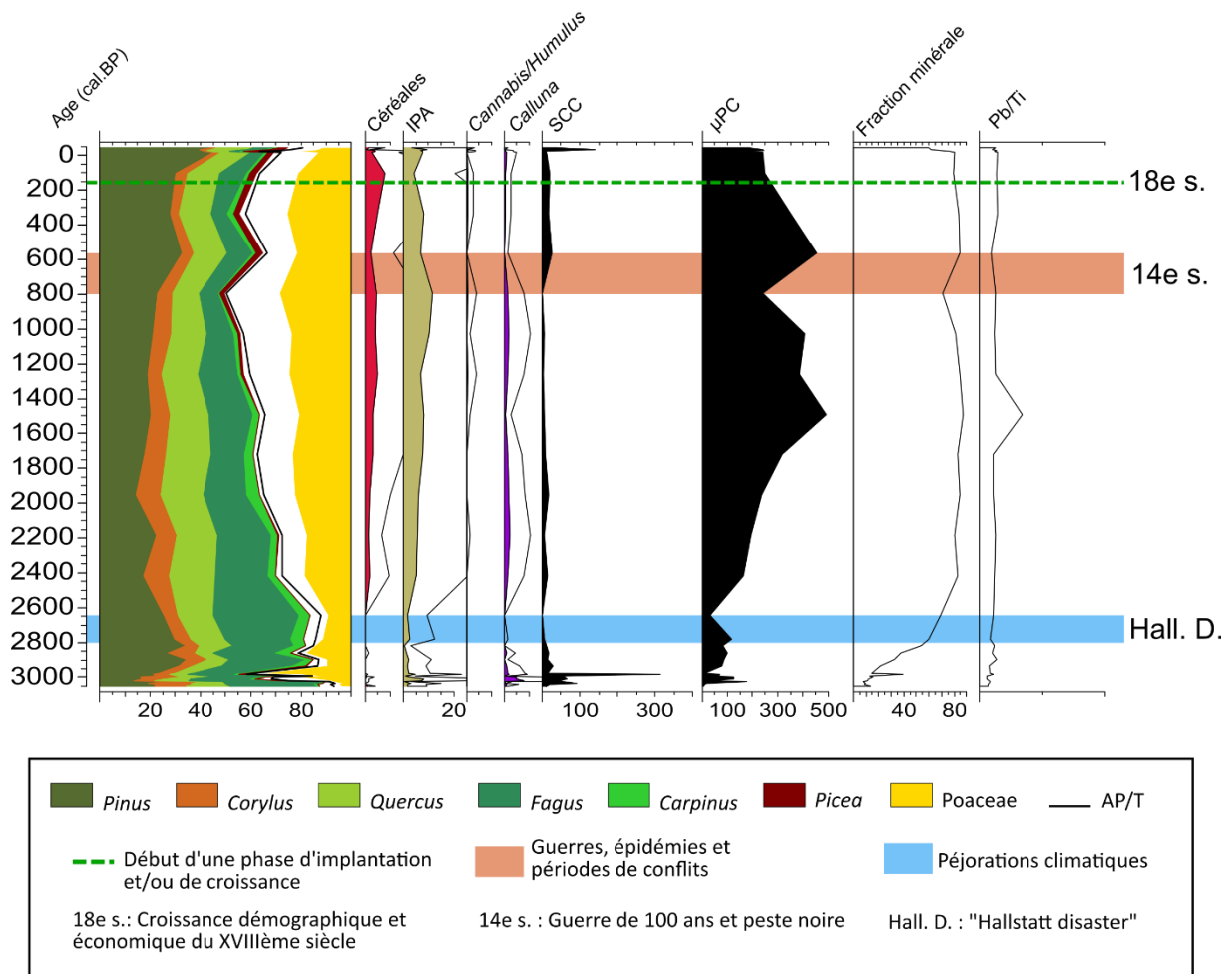


Figure VI.2-2 : Impact de l'histoire des sociétés autour de la tourbière de HOR à partir de 3000 cal. BP (1050 cal. BC). (IPA : indices polliniques d'anthropisation, SCC : spores de champignons coprophiles, μPC : micro-particules carbonisées)

L'âge du Fer, et particulièrement le second âge (La Tène), constitue également une période de forte augmentation des impacts humains dans toutes les régions alentour avec des activités de culture de céréales continues ainsi que du pâturage et de l'élevage, engendrant une nette diminution des arbres, (ETIENNE *et al.*, 2013 ; JANSSEN & JANSSEN-KETTLITZ, 1972 ; KALIS, 1985 ; MÄCKEL *et al.*, 2009 ; RÖSCH, 2007 ; RUFFALDI *et al.*, 2015 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015).

VI.2.2. L'époque romaine

Les découvertes archéologiques sont très nombreuses dans le Pays de Bitche pour cette période, mais essentiellement, là encore, dans le pays découvert (Figure VI.1-1), alors que le pays couvert ne compte qu'un très faible nombre de découvertes. D'après notre étude, le pays couvert n'est pas vide d'homme à cette époque, et les populations pratiquent des activités agropastorales et métallurgiques.

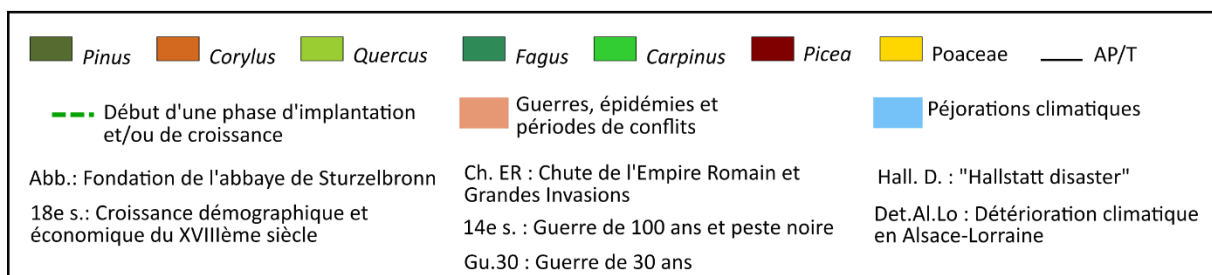
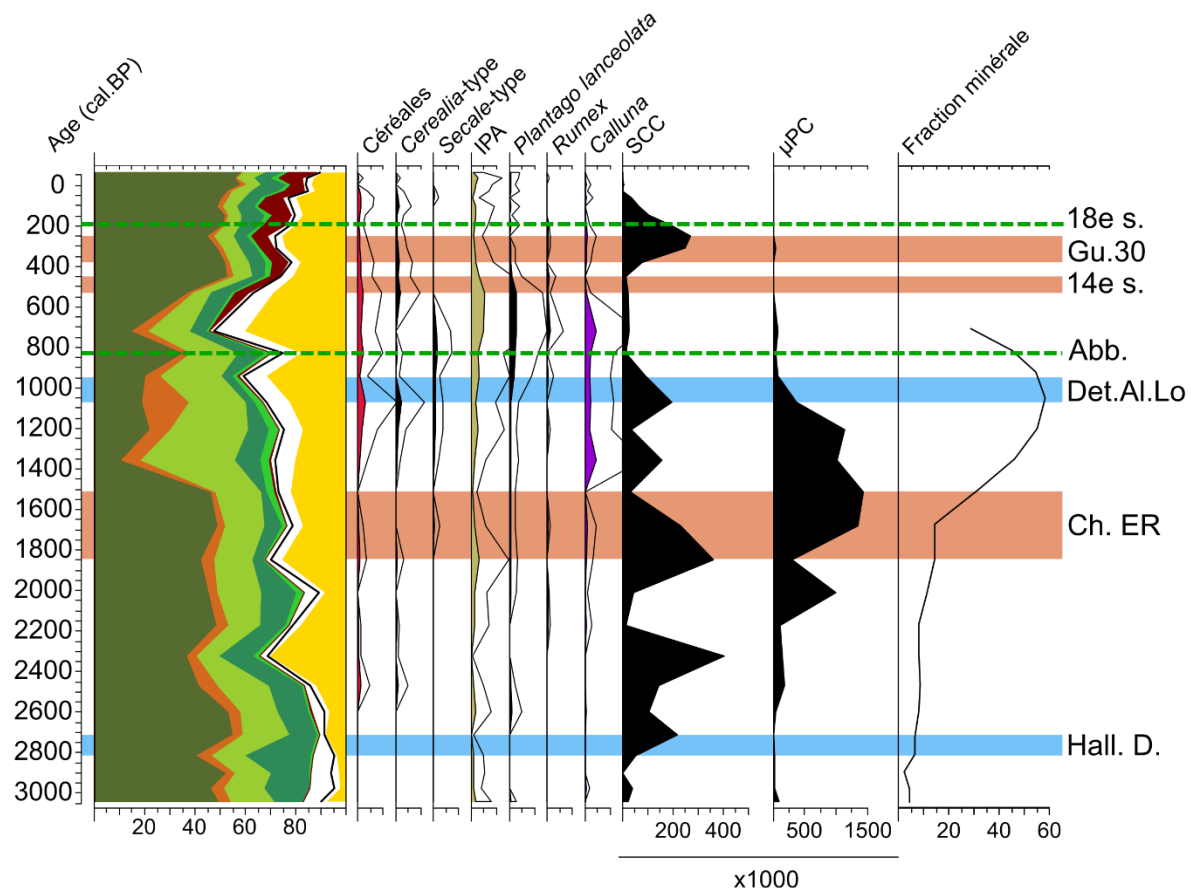


Figure VI.2-3 : Impact de l'histoire des sociétés autour de la tourbière de KOH à partir de 3000 cal. BP (1050 cal. BC). (IPA : indices polliniques d'anthropisation, SCC : spores de champignons coprophiles, µPC : micro-particules carbonisées)

Cependant, l'intensité de ces pratiques est sûrement de moindre importance face à l'intensification des défrichements et des activités agropastorales enregistrée, par exemple, dans la plaine du Rhin Supérieur ou sur le Plateau Lorrain (BEGEOT *et al.*, 2019 ; MÄCKEL *et al.*, 2009).

En effet, dans la plaine du Rhin, l'époque romaine est une période d'intensification des pratiques agropastorales et des activités minières (MÄCKEL *et al.*, 2009). Ces activités impactent alors fortement le paysage, tout comme les nombreuses constructions (villes, routes...) qui sont entreprises à cette époque. Les cultures du châtaignier et du noyer sont également importées et développées par les populations romaines, alors que dans le Pays de Bitche les premiers pollens ne sont identifiés qu'à partir du Moyen Âge. Sur le Plateau Lorrain, cette période est également celle d'intenses défrichements, comme l'atteste la découverte de parcelles antiques sous les forêts actuellement considérées comme « anciennes » (DUPOUEY *et al.*, 2002 ; GEORGES-LEROY *et al.*, 2007). L'intensité des pratiques à l'époque romaine dans le Pays de Bitche est donc nettement réduite par rapport à celle des zones de plaine.

En revanche, cette faible pression anthropique est cohérente avec les observations faites dans le Massif des Vosges, où la période gallo-romaine est caractérisée par une diminution de la pression anthropique et par la reforestation des champs et des prairies abandonnées suite à l'exode des populations vers les plaines plus riches (KALIS, 1985). De même, les Hautes-Chaumes du massif du Rossberg (Vosges cristallines) sont abandonnées après le second âge du Fer et se referment (GOEPP *et al.*, 2007).

Cet abandon des anciennes occupations humaines est également perceptible dans le Morvan (Bourgogne), où les données archéologiques et polliniques montrent également l'abandon de la cité celte de Bibracte pour la nouvelle ville romaine (JOUFFROY-BAPICOT, 2007).

Cependant, le Pays de Bitche n'enregistre pas de recul de l'anthropisation à cette époque, ce qui rend donc peu probables un abandon de cette zone et une migration des populations vers les plaines plus fertiles où se localisent préférentiellement les grandes villes romaines.

Une autre hypothèse est que le pays couvert soit resté en marge de la romanisation du fait de ses denses forêts et de son sol pauvre. Cette hypothèse rejoint celle faite par Pétry (1981) au sujet des populations des Vosges Gréseuses (Hautes et Basses) appartenant à la « Culture des Sommets Vosgiens », qui seraient des populations médiomatriques « démunies » ou « marginales » rejetées des plaines par l'occupant romain (FREYSSINET, 2007 ; MEYER & NÜSSLEIN,

2014). Pour Lutz (1960), il s'agirait de populations envoyées par des propriétaires de grands domaines, localisés dans la plaine, pour exploiter le grès ou le bois et qui s'installeraient autour de petites exploitations agricoles (FREYSSINET, 2007).

Enfin, on ne peut écarter l'hypothèse selon laquelle les denses forêts des Vosges du Nord étaient considérées à cette époque comme un lieu de sanctuaire. Celle-ci serait alors cohérente avec la faible présence humaine dans ces forêts, dans lesquelles on trouve en revanche de nombreux blocs de grès sculptés représentant des divinités. Cette idée irait également dans le sens d'une région densément boisée, restée sauvage comme en témoignent les écrits de Pline et de César et la toponymie du massif des Vosges, dérivant de *Vosegus*, dieu de la forêt et de la chasse pour les gallo-romains (FLOTTE & FUCHS, 2004 ; PARMENTIER, 2007). La présence de voies de circulation, comme l'atteste par exemple l'élément de voirie gallo-romaine de Bitche, expliquerait en revanche la présence de petites populations, dispersées dans le massif.

La fin de l'époque romaine est marquée par l'abandon du *Lime* en 260 cal. AD et par la période des Grandes Invasions par les peuples barbares, qui débute à partir de la seconde moitié du III^{ème} siècle, alors que le climat se dégrade à partir de 270 cal. AD, devenant plus froid et plus humide (GOEPP, 2007 ; LE ROY LADURIE, 2009 ; MÄCKEL *et al.*, 2009). Dans l'est du Pays de Bitche, ces temps de troubles et d'instabilité politique ont engendré une phase de déprise agropastorale perçue par l'abandon des champs et des pâturages et par un retour de la forêt (Figure VI.2-3). Cette déprise semble durer autour du site de Waldeck, où le début du Haut Moyen Âge est également caractérisé par une phase de régression des activités agropastorales et par un environnement qui reste très forestier (Figure VI.2-4).

Cette déprise est régionale car elle est perçue dans les régions voisines (KALIS, 1985 ; MÄCKEL *et al.*, 2009 ; RUFFALDI *et al.*, 2007). Effectivement, dans tout le Massif Vosgien, cette période est marquée par l'abandon des pratiques agropastorales et le retour de la forêt (GUILLET *et al.*, 1976 ; JANSSEN & JANSSEN-KETTLITZ, 1972 ; KALIS, 1985). Puis, durant le Haut Moyen Âge qui reste très forestier, les Hautes-Chaumes sont abandonnées et recolonisées par le hêtre et le sapin (BEGEOT *et al.*, 2019 ; GOEPP, 2007). Dans la plaine du Rhin Supérieur, en Forêt Noire et sur le Plateau Lorrain, la déprise est également perçue à la fin de l'époque romaine puis au Haut Moyen Âge et induit une régénération de la forêt (ETIENNE *et al.*, 2013 ; MÄCKEL *et al.*, 2009 ; RÖSCH, 2007 ; RUFFALDI *et al.*, 2007).

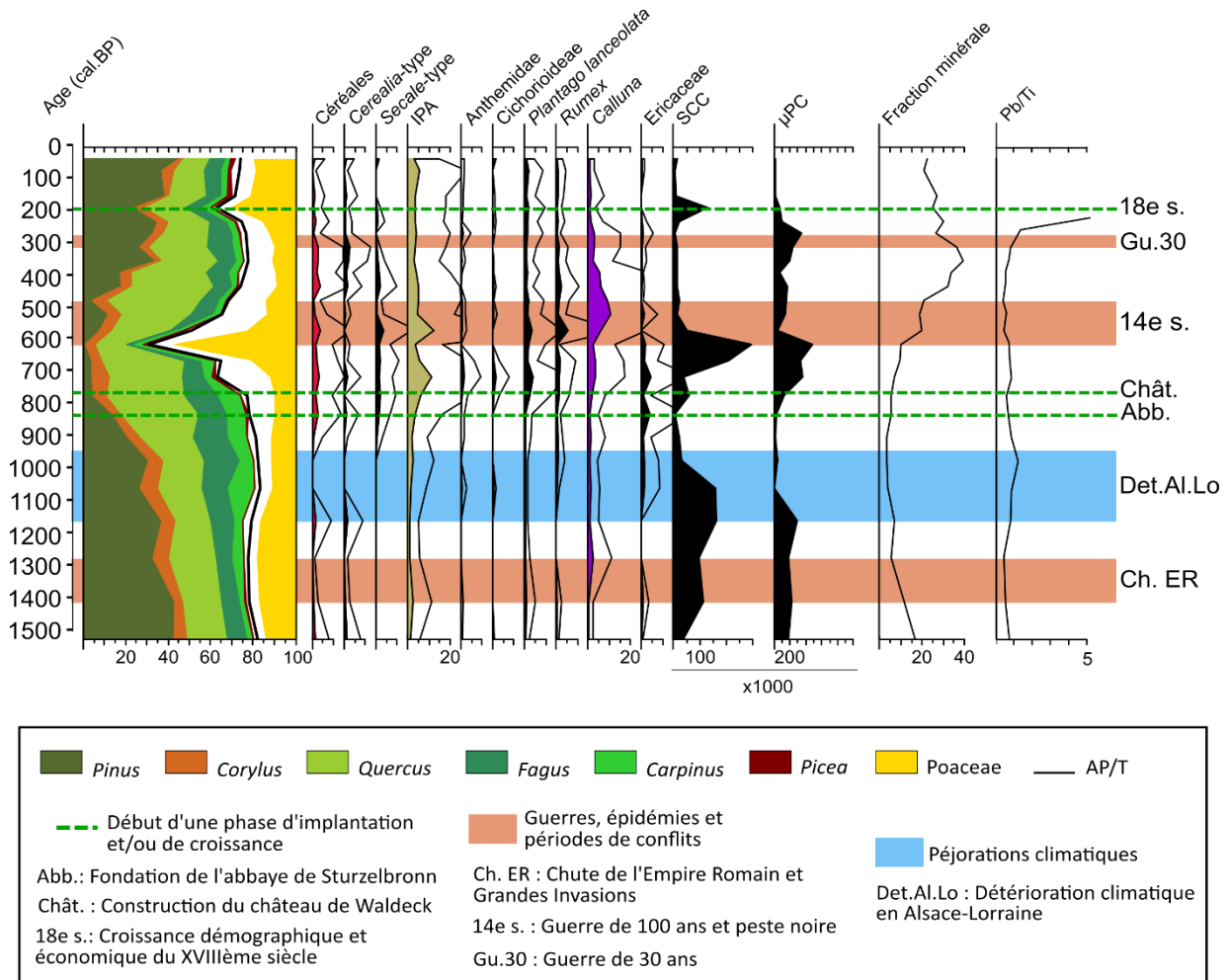


Figure VI.2-4 : Impact de l'histoire des sociétés autour de la tourbière de WAL à partir de 1500 cal. BP (450 cal. AD). (IPA : indices polliniques d'anthropisation, SCC : spores de champignons coprophiles, µPC : micro-particules carbonisées)

VI.2.3. Du Moyen Âge à nos jours : le Pays de Bitche face à l'histoire

VI.2.3.1. Modifications de l'utilisation des paysages du Pays de Bitche au Moyen Âge et à l'époque moderne dans le contexte régional

La période de forte intensification et de diversification des pratiques humaines, observée dans le Pays de Bitche au Moyen Âge, est également enregistrée dans toutes les régions alentour et plus généralement en Europe. Elle intervient alors que le climat devient plus clément, au cours de l'Optimum Climatique Médiéval, de 900 à 1300 cal. AD (LE ROY LADURIE, 2009). Le XIème siècle marque très souvent le début de l'augmentation de la pression

anthropique sur le paysage et correspond à la grande phase de défrichements connue à l'échelle européenne (JOUFFROY-BAPICOT *et al.*, 2007).

Cette intensification des impacts anthropiques est perçue en Forêt Noire, dans la région du Rhin Supérieur et sur le Plateau Lorrain, où des déforestations importantes et des activités agropastorales croissantes sont enregistrées avec un impact grandissant sur le paysage (ETIENNE *et al.*, 2013 ; MÄCKEL *et al.*, 2009 ; RÖSCH, 2007 ; RUFFALDI *et al.*, 2015). Les industries consommatrices de bois se développent également, comme les activités minières dans les Vosges et l'exploitation du sel sur le Plateau Lorrain.

Dans cette dernière région, le Moyen Âge est marqué par la transition d'un système pastoral à un système agraire. En effet, au cours de l'âge du Fer et de la période romaine, les populations du Plateau Lorrain pratiquent principalement l'élevage, alors que les cultures de céréales restent secondaires. Au Moyen Âge, la prédominance des pratiques agraires et pastorales s'inverse. Dans le Pays de Bitche, nos résultats ne montrent pas un remplacement aussi net. En effet, bien que les premières ouvertures significatives de l'âge du Bronze soient liées à des phases d'élevage, celles-ci restent très limitées dans le temps et l'espace et au Moyen Âge, on assiste à une évolution conjointe des deux pratiques. Cette intensification conjointe de l'agriculture et de l'élevage est plutôt cohérente avec ce qui est connu pour les Vosges du Nord et plus généralement pour le massif des Vosges, où l'élevage constitue une source de subsistance indispensable, palliant les faibles rendements agricoles (HIEGEL, 2006 ; JEHIN, 2005 ; ROCHEL, 2004).

Le développement de la culture du seigle à partir du début du Moyen Âge dans le Pays de Bitche coïncide avec l'expansion de sa culture, attestée en France dès le Haut Moyen Âge (Sigaut, 1995 ; Thiébault, 2010). En effet, le seigle aurait été introduit en France à la transition âge du Fer/époque romaine – sa première mention par Pline l'ancien dans son *Histoire naturelle* datant du Ier siècle de notre ère – mais l'expansion de sa culture, comme céréale d'hiver, semble effectivement dater du Haut Moyen Âge (IV^{ème}-X^{ème} siècle) (Sigaut, 1995 ; Thiébault, 2010).

Cependant, des analyses carpologiques indiquent que le seigle, en mélange avec le froment, constitue la base de l'alimentation dans le nord de la France entre les V^{ème} et le XI^{ème} siècles, alors qu'il semble, dans l'état actuel des connaissances, peu présent dans les sites archéologiques lorrains et alsaciens (BONNAIRE & WIETHOLD, 2010). Bien que sa place dans le

système de culture soit impossible à appréhender par la palynologie, nos données attestent en revanche de sa culture dans la région des Vosges du Nord au Moyen Âge.

Cette culture médiévale du seigle est également observée à l'échelle régionale. Il est identifié, par exemple, dans les mardelles intra-forestières du Plateau Lorrain, où ses pourcentages restent cependant toujours inférieurs à ceux du type *Cerealia*, à l'inverse de ce qui est observé dans les sites de l'est du Pays de Bitche. Il est également identifié dans les diagrammes polliniques de l'Allemagne et dans les Hautes-Vosges gréseuses, depuis le Moyen Âge Central (RÖSCH *et al.*, 2014 ; SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015). Le seigle constitue la principale céréale cultivée à l'est du Rhin, en Europe Centrale et Orientale (Allemagne du Nord et Centrale, Suisse, Pays-Bas, Pologne...) où il est adapté aux sols pauvres et sablonneux, ainsi qu'aux zones de montagne (BONNAIRE & WIETHOLD, 2010 ; SCHILPEROORD, 2017). Ainsi, du fait de la nature de ses sols, le Pays de Bitche possède un système médiéval de culture qui semble plus proche de celui des régions du nord de la France et d'Europe Centrale et du Nord, plutôt que de celui du Plateau Lorrain.

De plus, l'existence d'un système sur abattis-brûlis, qui se met en place à partir de la fin du Moyen Âge et à l'époque moderne dans le Pays de Bitche, est également attestée dans plusieurs régions alentour et dans d'autres régions d'Europe. D'après HERRMANN (1914), l'agriculture sur abattis-brûlis a perduré longtemps dans le nord des Vosges, ce qui est confirmé dans les Hautes Vosges gréseuses, à la tourbière du Rond Pertuis supérieure, par une augmentation des particules de charbons après 1900 (SUDHAUS & FRIEDMANN, 2015). De même, sur les bords du Rhin et de la Forêt Noire jusqu'aux Ardennes, le système agricole repose sur la culture du seigle sur écobuage ou essartage jusqu'au XIXème siècle (SIGAUT, 1995). Enfin, de nombreuses études menées dans le nord de l'Europe ont également montré une culture du seigle sur essartages jusqu'à des périodes assez récentes (XVIème siècle) (Finlande, Suède, BEHRE, 1988 ; EMANUELSSON & SEGERSTRÖM, 2002 ; GRÖNLUND & ASIKAINEN, 1992).

Sur le Plateau Lorrain, les mardelles intra-forestières enregistrent un changement de l'utilisation du paysage à la transition Moyen Âge/époque moderne. À cette époque, des forêts sont attribuées aux salines pour assurer leur approvisionnement en combustible, alors que les indices d'anthropisation sont réduits mais attestent encore de pratiques agricoles et pastorales à la lisière des forêts. (ETIENNE, 2011 ; ETIENNE *et al.*, 2013). Une dynamique de recolonisation forestière est alors observée et attribuée à la gestion des forêts par une exploitation en taillis

à courte rotation (35 ans) qui dure du XV^{ème} siècle à la Révolution Industrielle. Par la suite, l'époque moderne est caractérisée par la Révolution Industrielle et une nouvelle gestion forestière qui impose alors un allongement des rotations et une exploitation en futaies, qui engendrent une augmentation des pourcentages polliniques de *Carpinus* et *Fagus* et une diminution de ceux de *Quercus* (ETIENNE *et al.*, 2013). Ces observations (diminutions des activités agropastorales, développement des industries, retour de la forêt et diminution de *Quercus*) sont similaires à ce qui est observé dans le Pays de Bitche pour l'époque moderne.

À l'inverse, dans les Vosges cristallines, alors que les activités minières sont en augmentation au XVI^{ème} siècle, les données polliniques attestent de la persistance des activités agropastorales, témoignant d'une double utilisation du paysage dans les vallées (MARIET, 2016 ; MARIET *et al.*, 2016). De plus, la fin du XVI^{ème} siècle est marqué par une ouverture des forêts. Ce n'est que très tardivement, après 1950, que le retour du couvert forestier et la déprise agricole sont attestés autour des sites du Hury et du Champ du Feu.

Ainsi, la gestion des forêts du Pays de Bitche est donc cohérente avec celle du Plateau Lorrain, les deux régions étant soumises à la politique des Ducs de Lorraine. Celle-ci a permis le maintien d'une surface boisée importante, malgré l'exploitation du bois par les industries, et le retour des forêts, qui semble plus précoce en Lorraine, comparé à ce qui est observé pour les régions minières du Massif des Vosges.

Ainsi, l'évolution des pratiques du Pays de Bitche s'intègre parfaitement dans le contexte médiéval régional. En revanche, la nature des sols de cette région induit la mise en place d'un système agropastoral un peu différent de celui observé dans le reste du Duché de Lorraine, mais proche de celui connu pour le Massif des Vosges, et d'un système de culture des céréales qui est à rapprocher de celui des régions d'Europe Centrale et du Nord.

Bien que les vestiges archéologiques soient extrêmement rares pour le Haut Moyen Âge (Figure VI.1-1), les textes anciens nous informent sur les événements de la période médiévale et de l'époque moderne, pour laquelle nous disposons également des sites industriels ou de leur vestige (Figure VI.1-1) Ces périodes sont ainsi ponctuées d'évènements historiques ou climatiques, plus ou moins bien documentés dans notre région d'étude, et il est intéressant de voir s'il est possible d'appréhender leurs impacts sur les populations et le paysage du Pays de Bitche, au travers de nos résultats.

VI.2.3.2. La détérioration climatique en Alsace-Lorraine (800-1050 cal. AD)

Un des premiers évènements perçus au Moyen Âge est d'ordre climatique et touche particulièrement l'est du pays couvert de la fin du VIII^{ème} siècle à la fin du X^{ème} siècle. Les sites de l'est enregistrent durant cette période, une déprise agropastorale importante, caractérisée par l'abandon des cultures et l'arrêt des pratiques pastorales (Figure VI.2-3, Figure VI.2-4). L'exploitation de la forêt est alors réduite et celle-ci revient autour des sites.

À cette époque, de la fin du VIII^{ème} siècle au milieu du XI^{ème} siècle, les archives d'Alsace et de Lorraine recensent de très nombreux hivers extrêmement froids, lors desquels les grands fleuves sont entièrement gelés, des inondations très fréquentes dues à des périodes de précipitations abondantes, ou encore des tremblements de terre en 782 et 799, dont l'épicentre se situe à Wissembourg (30 km de WAL, 23 km de KOH) (BECK, 2011). Ces très nombreuses catastrophes naturelles impactent de manière très importante les activités agricoles car elles engendrent un climat défavorable à la culture des céréales, entraînent de mauvaises récoltes ou ruinent les semailles. L'élevage est également touché car les mauvaises saisons empêchent le stockage de foin. Le bétail, alors mal nourri au cours de la mauvaise saison, est très sensible aux épizooties qui le déciment. Il en va de même pour les populations humaines qui souffrent des nombreuses famines et subissent alors d'importantes épidémies, comme la peste. C'est le cas, par exemple, de l'année 869, au cours de laquelle la région d'Alsace-Lorraine, après avoir été touchée par trois années de mauvaises récoltes, souffre de la famine et de la peste qui fait rage dans toute l'Europe (BECK, 2011). De 900 à 1000 cal. AD, malgré le contexte de réchauffement climatique du Petit Optimum Médiéval (900-1300 cal. AD), la région est encore ponctuée d'hivers très froids (BECK, 2011 ; LE ROY LADURIE, 2009).

Ainsi, au cours de cette période d'instabilité climatique en Alsace-Lorraine (800-1050 cal. AD), les populations qui vivaient dans les fonds de vallons humides de l'est du pays couvert ont dû souffrir d'un climat particulièrement rude, ne permettant plus la culture des céréales et/ou de bonnes récoltes. Ces conditions de vie ont sûrement poussé les habitants à migrer vers des zones plus favorables, permettant le retour de la forêt sur les zones abandonnées.

VI.2.3.3. La fondation de l'abbaye de Sturzelbronn (1135 cal. AD)

À partir de 830 cal. BP (1120 cal. AD), les sites de Kobert-Haut et de Waldeck livrent plusieurs indices d'une importante occupation humaine, engendrant le recul de la forêt (Figure VI.2-3, Figure VI.2-4). Ces indices sont contemporains de la fondation de l'abbaye de Sturzelbronn (1135 cal. AD), non loin du site de Kobert-Haut (2,5 km), occupée à partir de 1143 par une communauté de moines cisterciens. L'intensification des déboisements jusqu'à 720 cal. BP (1230 cal. AD) autour du site de Kobert-Haut est donc certainement liées aux pratiques des moines cisterciens, bien connus pour leurs travaux de défrichement et la mise en place de leurs domaines agricoles. De plus, la création d'un étang autour de 700 cal. BP (1250 cal. AD) à Kobert-Haut (cf. V.2.2) pourrait également être attribué aux moines de l'abbaye de Sturzelbronn pour des activités de pisciculture puisqu'à son apogée, l'abbaye comptait 14 étangs dont la production piscicole était commercialisée (MATHIS & MATHIS, 2016).

L'abbaye de Sturzelbronn est couramment considérée comme le départ de l'anthropisation dans le Pays de Bitche, mais notre étude atteste d'une présence humaine importante antérieure à sa fondation. De plus, même si celle-ci a engendré une augmentation de la pression anthropique, son influence se cantonne à l'est du pays couvert et l'exploitation du paysage reste tout de même modérée.

La fondation de l'abbaye de Sturzelbronn s'inscrit dans une vague d'implantation de monastères et d'abbayes, qui a lieu à l'échelle des Vosges au cours des XI et XIIèmes siècles et engendre une croissance démographique au cœur même des massifs forestiers. Ainsi, dans les diagrammes des Vosges cristallines, des phases d'anthropisation sont également observées à la suite de la fondation de couvents ou de monastères (Tourbière du Tanet, JANSSEN & JANSSEN-KETTLITZ, 1972 ; Tourbière du Hury, MARIET, 2016).

VI.2.3.4. La construction du château de Waldeck

La tourbière de Waldeck, directement localisée au pied du château du même nom, enregistre une accélération et une intensification des déboisements à partir de 770 cal. BP (1180 cal. AD). La forêt recule alors de manière très importante pour la première fois de la séquence (Figure VI.2-4). Le pin, le hêtre et le charme sont largement exploités dans un premier temps puis le chêne est à son tour brusquement et fortement impacté. Cet important

déboisement est également accompagné par une forte augmentation des activités agro-pastorales.

Ce déboisement sans précédent et très rapide est cohérent avec les données disponibles sur la période de construction du château de Waldeck, typique des châteaux troglodytiques des Vosges du Nord, construits à même les rochers gréseux, dont la première mention date de 1227, sous la forme de *Waldescke* (HIRSCHINGER, 1991 ; MENGUS, 2009 ; RUDRAUF, 2009a, 2009b, 2008).

L'édification du château a dû nécessiter de grandes quantités de bois de construction car les ruines des châteaux troglodytes montrent encore les points d'ancrage d'éléments en bois à même la paroi (trou de boulins et trous de poteaux) (RUDRAUF, 2009b). Au Moyen Âge, le chêne est l'essence principalement utilisée comme bois de construction, mais il semble que dans les milieux défavorables à la croissance de cette essence, les résineux pouvaient également être utilisés (BURNOUF *et al.*, 2012). Autour de Waldeck, l'utilisation du pin peut s'expliquer par le maintien du chêne, à cette époque, pour assurer la pratique de la grasse pâture (cf. V.1.2.2.3) De plus, le pin est une essence qui est souvent utilisée dans l'industrie du bâtiment, notamment pour la construction des charpentes (LIEUTAGHI, 2004 ; RAMEAU *et al.*, 1989).

Par la suite, la forêt entourant le château est certainement déboisée pour en assurer la sécurité et en surveiller les alentours. Elle constitue également une ressource locale importante pour l'approvisionnement du château en bois de chauffage.

Concernant les activités agro-pastorales, un acte de cession rédigé en 1445 précise que les dépendances du château de Waldeck rassemblent ses forêts, pâturages, chasse, pêche, labours, prés, étangs, droits et terres (TRENDEL & BARABINOT, 1999). Ainsi, l'étang créé à partir de la zone humide de Waldeck vers 620 cal. BP (1330 cal. AD) (cf. V.2.2) faisait donc très certainement partie du fief castral.

Les archives, tant historiques que polliniques, indiquent donc que le château de Waldeck possédait un domaine largement exploité et que son installation a provoqué une très importante phase d'occupation, impactant fortement le paysage jusqu'alors très peu perturbé.

VI.2.3.5. Le XIVème siècle

Au cours des XIVème et XVème siècles, les sites du Pays de Bitche enregistrent un net retour de la forêt, alors que tous les indices d'anthropisation régressent indiquant une déprise agropastorale de la région (Figure VI.2-4, Figure VI.2-3, Figure VI.2-2).

Cette phase de déprise est contemporaine de la guerre de Cent Ans, qui éclate à cette époque entre 1337 et 1453, et de l'épidémie de peste noire, qui s'abat sur l'Occident et frappe la Lorraine entre 1411 et 1439. Ces événements ont une incidence régionale, induisant une période de réduction de la pression anthropique en France et en Allemagne (RÖSCH, 1992 ; RUFFALDI *et al.*, 2007 ; THIEBAULT, 2010). De plus, les prémices du Petit Âge Glaciaire, qui débute autour de 1300 cal. AD, se font peut-être également sentir dans les fonds de vallon tourbeux du Pays de Bitche (LE ROY LADURIE, 2009).

Nos données montrent donc que dans ce contexte, historique et climatique, la pression anthropique sur le paysage diminue, indiquant que les vallées du Pays de Bitche sont fortement touchées par les événements, et que le nombre d'habitants chute, probablement à la suite de mouvements de populations, qui quittent les régions où les conditions de vie sont devenues trop difficiles.

Après ce ralentissement des activités humaines, la pression anthropique, agropastorale et industrielle, réaugmente dans le Pays de Bitche à partir de la seconde moitié du XVème siècle, et le XVIème siècle est caractérisé dans la région par une forte croissance démographique. Cependant, les activités agropastorales ne retrouvent pas leur intensité du Moyen Âge et le paysage est toujours en cours de reconquête forestière.

VI.2.3.6. La Guerre de Trente ans (1618-1648)

Très rapidement, les activités humaines sont à nouveau impactées par le cours de l'histoire lorsque la Guerre de Trente Ans éclate et que les troupes suédoises atteignent le Pays de Bitche à partir de 1632 cal. AD. Les combats entraînent de très nombreuses destructions et pillages, les usines sont ruinées et les industries sont à l'arrêt (JEHIN, 2005). En 1635, le château de Waldeck, déjà décrit en ruine en 1594, est détruit par les troupes françaises.

Nos résultats montrent que la pression anthropique diminue dans les vallées à l'est du pays couvert, qui sont alors fortement dépeuplées, voire désertées. Les activités agropastorales, et

notamment la culture des céréales, régressent, sans pour autant occasionner un net retour de la forêt (Figure VI.2-3, Figure VI.2-4). En revanche, autour de la tourbière de Waldeck, le hêtre se développe légèrement alors que le chêne continue de régresser car, comme il n'est plus maintenu par les activités agropastorales, les autres essences forestières redeviennent plus compétitives. Ce retour du hêtre dans les forêts du Pays de Bitche, suite à la Guerre de Trente Ans, est également noté dans les textes datant de 1756, publiés dans l'*Atlas topogéographique du Comté de Bitche* (SCHNITZLER, 2020).

VI.2.3.7. La croissance démographique et économique des XVIIIème et XIXème siècles

Ce n'est qu'à la fin du XVIIème siècle et essentiellement à partir du XVIIIème siècle que les activités agricoles reviennent légèrement dans l'est du pays couvert et que la forêt est de nouveau exploitée (Figure VI.2-3, Figure VI.2-4). Autour de Bitche, la culture des céréales atteint son intensité maximale autour de 1850 cal. AD (Figure VI.2-2).

Ces nouvelles phases d'agriculture et d'exploitation forestière sont cohérentes, tout d'abord, avec la fin de la Guerre de Trente Ans (1648), puis, avec la croissance démographique et économique qui débute autour de 1720-30 dans le Pays de Bitche. En effet, suite à la Paix de Ryswick en 1697, une période de paix débute pour le Duché de Lorraine et le Duc Léopold souhaite le repeupler en favorisant l'immigration et les défrichements (cf. I.1.2.4) (JEHIN, 2005). La fin du XVIIème siècle et le XVIIIème siècle voient également le développement des activités métallurgiques dans les Vosges du Nord, qui nécessitent de grandes quantités de combustible. De plus, à cette époque, les pins des foreries de Waldeck et de Sturzelbronn sont largement exploités pour la construction navale (JEHIN, 2006, 2005).

Autour de La Horn, l'intensification des cultures peut également être reliée au développement de la ville de Bitche (1,5 km au nord de la tourbière), dû à son intérêt stratégique, mis en évidence lors des conflits du XVIIème siècle, et à la construction de la citadelle de Bitche, par Vauban à la fin de ce siècle.

La cartographie des découvertes archéologiques du Pays de Bitche (Figure VI.1-1) montre une nette dichotomie pays découvert/pays couvert. Or, la comparaison de ces données archéologiques avec les résultats de notre étude a montré que, bien que les traces

d'occupation humaines soient rares dans le pays couvert, la présence de populations, dont les activités impactent l'environnement, est attestée depuis le Néolithique. Ce résultat confirme que la rareté des vestiges du pays couvert résulte de la difficulté à effectuer des fouilles et prospections sous le couvert forestier et/ou d'un problème de conservation.

En revanche, l'étude menée sur les séquences du pays couvert a permis de mettre en évidence un gradient est/ouest de l'anthropisation du Pays de Bitche.

VI.2.4. Mise en évidence d'un gradient est-ouest d'anthropisation

Ce gradient est mis en évidence dès le Néolithique, quand les indices de cultures des céréales sont majoritairement observés dans les environs directs de Bitche, alors qu'ils restent anecdotiques dans l'est du Pays de Bitche. Cette première observation peut avoir plusieurs explications.

Tout d'abord, le bassin versant du site de La Horn est une large vallée ouverte à fond plat, plus favorable à l'installation de cultures de céréales que le sont les bassins versant des deux autres sites, aux fonds tourbeux encerclés de reliefs très proches. De plus, ces reliefs et les sols pauvres du pays couvert ne sont pas favorables à l'installation des populations de la culture Rubanée qui se concentrent principalement à proximité des cours d'eau, dans les zones loessiques des plaines, qui offrent de très bonnes conditions pour la culture des céréales (SCHMIT, 2006 ; WHITTLE, 1985). La concentration des découvertes archéologiques dans le pays découvert et sur les marges des Vosges du Nord attestent bien de la recherche par ces populations de terres plus riches, les vestiges découverts à proximité des sites étudiés se limitant à quelques outils lithiques (Bitche) et à quelques haches (Sturzelbronn, Eguelshardt) (SCHMIT *et al.*, 2017).

Cependant, la région de Bitche se trouve à proximité de la limite entre les couches gréseuses pauvres du Buntsandstein et les couches plus riches en marnes et argiles du Muschelkalk et ses sols peuvent donc, localement, être légèrement enrichis par des apports provenant de l'érosion des terrains plus riches qui la surplombent (Figure I.1-6).

Enfin, la proximité du pays découvert et du Plateau Lorrain, où ont été découverts de nombreux outils et structures liés à la pratique agricole au Néolithique, a pu également favoriser la diffusion des populations dans la région de Bitche (BLOUET & LANSIVAL, 1993 ; SCHMIT *et al.*, 2017). Au vu de la proximité de ces zones plus favorables à la culture, certains grains de

pollen de céréales pourraient avoir été transportés par les vents directement depuis les milieux cultivés du pays découvert et du Plateau Lorrain, qui surplombent les « cuvettes » du Pays de Bitche. Cependant, au cours du Néolithique, le paysage autour du site de HOR était clairement dominé par la forêt, dans laquelle seules quelques clairières restreintes étaient ouvertes à l'époque, et il est donc peu probable que des pollens de céréales, dont la dispersion est faible, aient pu parvenir jusqu'au point de prélèvement (DIOT, 1992 ; MIRAS, 2009).

Par la suite, l'évolution des pratiques agropastorales se fait plus tardivement dans l'est du pays couvert. En effet, à l'ouest du pays couvert, la transition vers un système agro-pastoral diversifié et comprenant un système à jachères herbacées intervient dès l'âge du Fer, lors de la révolution agricole de l'Antiquité. En revanche, il est connu que la mise en place du nouveau système agricole à l'Antiquité a été progressif et que certains terrains se sont montrés moins favorables à la nouvelle méthode de culture, comme les sols trop pauvres, filtrants ou les terrains accidentés (MAZOYER & ROUDART, 2002). Ceux-ci ont alors continué à être cultivés par abattis-brûlis ou ne seront cultivés qu'après la révolution agricole du Moyen Âge. C'est ce qui est observé dans l'est du pays couvert, où la pratique de l'abattis-brûlis persiste jusqu'au Moyen Âge.

Les activités humaines de l'âge du Fer impactent fortement les forêts dans l'ouest du pays couvert, alors que, les forêts à l'est du Pays de Bitche reviennent, assez souvent, à leur étendue d'origine, même si les ouvertures qui les touchent sont plus étendues et plus durables qu'à l'âge du Bronze. De même, à l'époque romaine, l'agriculture reste toujours plus développée autour de Bitche, par rapport à l'est du pays couvert

De plus, au fil des époques, les petites vallées de l'est du pays couvert semblent plus sensibles aux variations climatiques et aux périodes de conflits et d'épidémies, qui ont très souvent été responsables de phases de migration des populations et d'abandon des sites, à l'inverse de la région de Bitche qui n'a jamais été abandonnée. C'est ce que l'on observe, par exemple, pour la Guerre de Trente Ans au cours de laquelle les activités humaines sont moins impactées par les conflits, probablement grâce au caractère stratégique de la ville.

L'organisation des paysages du Pays de Bitche au XIXème siècle a été reconstitué à partir des informations fournies par le cadastre « napoléonien » (vers 1830) qui permet de réaliser des reconstitutions paysagères (Figure VI.2-5, X. Rochel, données non publiées, comm. pers.

dans le cadre de l'OHM Pays de Bitche). Celles obtenues par exemple pour la commune de Hottviller, localisée sur les terrains du Muschelkalk, à la limite du pays couvert, et pour la commune d'Eguelshardt, sur laquelle se trouve la tourbière de Waldeck, illustrent bien la dichotomie est/ouest de l'anthropisation du Pays de Bitche. Dans l'est du pays couvert, le paysage du XIX^{ème} siècle est largement dominé par la forêt, comme l'indique nos données, et les terres cultivées et pâturées occupent une surface très réduite et se cantonnent principalement au fond des vallons. En revanche, sur les terrains plus riches à l'ouest, les terrains cultivés dominent largement le paysage et s'étendent des fonds de vallons jusqu'au sommet des reliefs, ne laissant plus que très peu de place aux forêts. La région de Bitche, où nos analyses ont montré une anthropisation plus importante qu'à l'est, se situe exactement entre ces deux localités et se trouve donc dans une zone de transition suivant le gradient est/ouest de la pression anthropique.

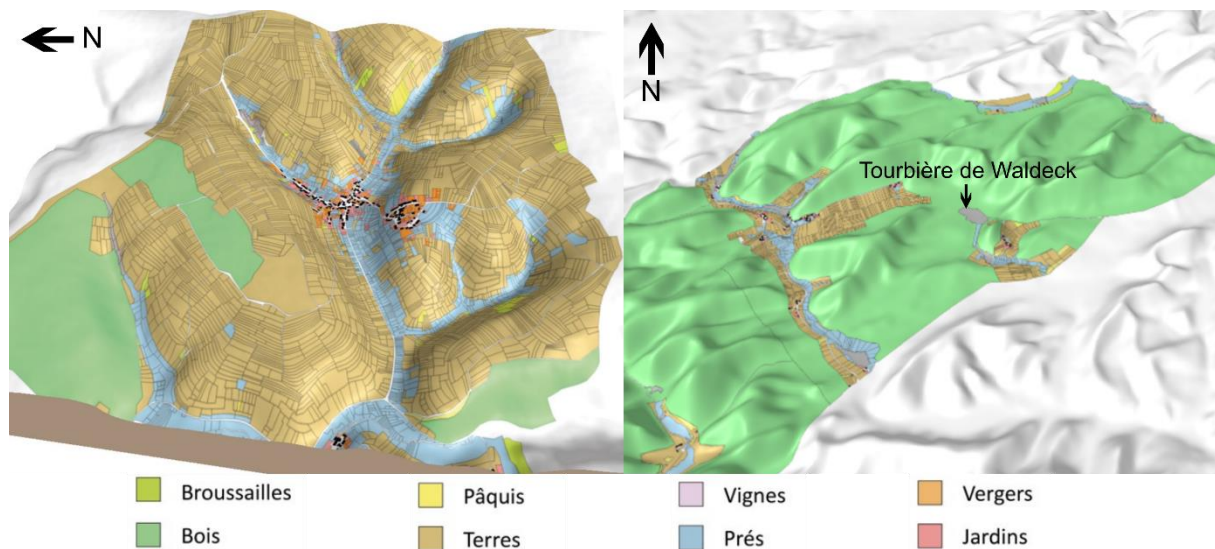


Figure VI.2-5: reconstitution paysagère d'après le cadastre « napoléonien » du XIX^{ème} siècle autour des communes d'Hottviller (à gauche) et d'Eguelshardt (à droite) (source : données non publiées, X.Rochel (LOTERR - Université de Lorraine))

En résumé, la comparaison des données archéologiques et de l'histoire de l'anthropisation du Pays de Bitche, reconstituée à partir de nos données, confirme une réelle lacune dans la connaissance des époques anciennes dans le pays couvert, attribuée à la difficulté des recherches archéologiques dans la région. De plus, la comparaison des données du Pays de Bitche avec celles des régions voisines a montré que notre région d'étude s'inscrit bien dans le contexte régional d'anthropisation mais qu'elle présente en revanche certaines particularités,

liées principalement à ses caractéristiques édaphiques. Ainsi, le Pays de Bitche semble être une région épargnée par la romanisation, probablement du fait de la présence de ses forêts encore denses à cette époque, surtout à l'est du pays couvert. De plus, son système agropastoral se rapproche plutôt de celui observé dans les régions continentales d'Europe Centrale et du Nord.

Nous avons donc vu que l'utilisation du paysage a directement impacté l'environnement de façon plus ou moins importante en fonction des périodes et des innovations. Les événements historiques et climatiques, quant à eux, ont eu une influence indirecte sur la végétation, en induisant des croissances ou des décroissances démographiques. L'analyse de raréfaction permet d'identifier leurs impacts sur la biodiversité.

VI.3. Reconstitution de l'évolution de la biodiversité passée

L'étude de la richesse pollinique estimée $E(Tn)$ permet d'appréhender l'évolution de la biodiversité passée. Celle-ci peut être divisée en plusieurs unités, en fonction des grandes tendances observées au cours du temps (BERGLUND *et al.*, 2008 ; MIRAS *et al.*, 2015). Les unités sont décrites dans le tableau VI.3-1 et présentées sur la figure VI.3-1.

De manière générale, aux alentours des tourbières, la diversité floristique passée a augmenté au cours du temps, en lien, d'une part, avec la succession des peuplements forestiers sous l'influence du climat depuis la Préhistoire, et, d'autre part, avec l'impact croissant des activités humaines depuis le Néolithique. Ainsi, le nombre moyen de taxons attendus ($E(Tn)$) montre une nette augmentation entre les unités à la base des séquences et celles à leur sommet : de 10,4 (K1) à 15,8 (K7) pour KOH, de 12,4 (H1) à 20,4 (H7) pour HOR et de 11,5 (W1) à 21,7 (W7) pour WAL.

Les unités K1 et H1 enregistrent une augmentation de la diversité floristique qui semble liée à la régression de la forêt boréale de pins et de noisetiers, face à la mise en place de la chênaie diversifiée de l'Optimum Climatique de l'Holocène.

La première augmentation de la richesse floristique en lien avec la pression anthropique semble liée à une très faible présence humaine, observée au Néolithique, avec la diffusion de la pratique de l'agriculture qui va engendrer l'apport de nouvelles espèces végétales, jusqu'alors absentes de notre région d'étude, telles que les céréales et d'autres plantes

messicoles (*Papaver* par exemple) ou rudérales (*Plantago lanceolata* par exemple) (BERGLUND *et al.*, 2008). C'est ce que l'on observe dans la séquence de WAL entre 6190 et 5745 cal. BP (W2). De plus, les clairières ouvertes dans l'espace boisé vont permettre le développement de plantes herbacées héliophiles jusqu'alors peu développées sous le dense couvert forestier des chênaies diversifiées. Cependant, on peut noter que le Néolithique dans le Pays de Bitche présente une très faible variation de la diversité floristique, confirmant la faible présence humaine à cette époque ainsi que le faible impact sur l'écosystème de la pratique d'une culture itinérante sur abattis-brûlis.

L'intensification et la diversification des activités agro-pastorales à partir de l'âge des Métaux ont nettement induit une augmentation de la diversité floristique autour des tourbières. Ainsi, les unités K4, W4 et H4 sont caractérisées par une forte augmentation de l'E(Tn), contemporaine, dans les trois sites, de présence de bétail (HOR, KOH) et de culture de céréales (WAL), ayant engendré les premières ouvertures du milieu boisé. De la même manière, les unités K3 et W5, bien que caractérisées par une tendance à la diminution de la diversité floristique, présentent des pics de l'E(Tn), correspondant à des phases d'occupations humaines, indiquées par l'augmentation des marqueurs d'anthropisation et par des ouvertures du couvert forestier. La plus importante hausse de la diversité pollinique est observée à partir de l'âge du Fer à HOR (H6) et au Moyen Âge pour KOH et WAL (K6, W6), lorsque les autres données témoignent d'une très forte intensification des pratiques et du passage à un système agraire à jachères herbacées. La diversité floristique atteint ensuite son maximum au Moyen Âge dans les trois sites (K7, W7, H7).

Les nombreuses perturbations engendrées par les activités humaines sur le couvert forestier à partir de l'âge des Métaux, telles que l'ouverture de clairières à vocation agricole dans les forêts, le mitage de la couverture forestière par le pâturage en forêt, la mise en place de prés, de prairies de fauche ou encore de landes et de jachères, vont engendrer le morcellement du paysage et la création de nouvelles niches écologiques, dans lesquelles de nouvelles communautés végétales vont s'établir et se maintenir.

Tableau VI.3-1 : Description de l'évolution de la diversité floristique (richesse pollinique attendue (E(Tn)) pour les trois séquences étudiées

Site	Unité	Age estimé (cal. BP)	E(Tn)	Commentaires
HOR	H7	795 à -27	21 à 22,3	Oscillation autour de la valeur maximale de la séquence
	H6	2820 à 795	10,5 à 21	Augmentation progressive
	H5	3010 à 2820	18,4 à 10,5	Forte et rapide diminution
	H4	3025 à 3010	11,3 à 18,4	Forte et rapide augmentation
	H3	4210 à 3025	16,3 à 11,3	Oscillations mais tendance globale à la diminution
	H2	7970 à 4210	16,9 à 16,3	Valeurs plus ou moins stables malgré quelques oscillations
	H1	9320 à 7970	9,5 à 16,9	Forte augmentation
	KOH	K8	530 à -65	15,9 à 9,9
K7		1210 à 530	16,4 à 15,9	Oscillation autour de la valeur maximale de la séquence
K6		1515 à 1210	11,7 à 16,4	Forte augmentation
K5		1845 à 1515	14,8 à 10,7	Forte diminution
K4		2325 à 1845	9,9 à 14,8	Forte augmentation
K3		4605 à 2325	15,5 à 9,9	Oscillation avec une tendance globale à la diminution mais avec plusieurs pics vers 3970, 3435, 3100 et 2595 cal. BP
K2		7795 à 4605	14 à 15,5	Valeurs plus ou moins stables
K1		9985 à 7795	9,4 à 14	Tendance à l'augmentation avec un pic à 9015 cal. BP
WAL	W8	235 à 44	24,6 à 19,4	Tendance globale à la diminution
	W7	720 à 235	24 à 24,6	Oscillation autour de la valeur maximale de la séquence
	W6	1160 à 720	12,1 à 24	Forte augmentation
	W5	3060 à 1160	15,8 à 12,1	Tendance globale à la diminution mais plusieurs pics vers 2365, 1935 et 1410 cal. BP
	W4	4940 à 3060	8,5 à 15,8	Augmentation progressive
	W3	5745 à 4940	13,7 à 8,5	Diminution progressive
	W2	6190 à 5745	10,3 à 13,7	Augmentation
	W1	6625 à 6190	12 à 10,3	Tendance à la diminution

De plus, entre les nouveaux espaces anthropisés, des zones de transition (écotone) se développent également et possèdent très souvent une diversité spécifique importante, telles que les lisières de forêt ou les bordures des champs. Ainsi, là où s'étendait auparavant un paysage très homogène, largement dominé par la forêt, dans laquelle quelques essences principales couvraient un sous-bois plus ou moins diversifié, se développe une mosaïque d'habitats écologiques d'origine anthropique, présentant une forte diversité floristique.

À l'inverse, les périodes de déprise anthropique, marquées par le retour de la forêt enregistrent une réduction de la diversité floristique. C'est le cas pour l'unité H5, entre 3010 et 2820 cal. BP, qui est contemporaine du retour des arbres suite à la détérioration climatique de l'Hallstatt et qui voit la diversité floristique passer de 18,4 à 10,5. De même, l'unité K5, entre 1845 et 1515 cal. BP, est corrélée à la phase d'abandon due aux invasions barbares et à la chute de l'Empire Romain. Lors de ces phases, l'arrêt des activités agro-pastorales et l'abandon des terrains jusqu'alors maintenus ouverts par les activités humaines permettent alors le retour de la forêt, ce qui tend à diminuer la diversité des plantes apophytes¹³ et des autres plantes herbacées dont les niches écologiques sont progressivement colonisées par les arbres.

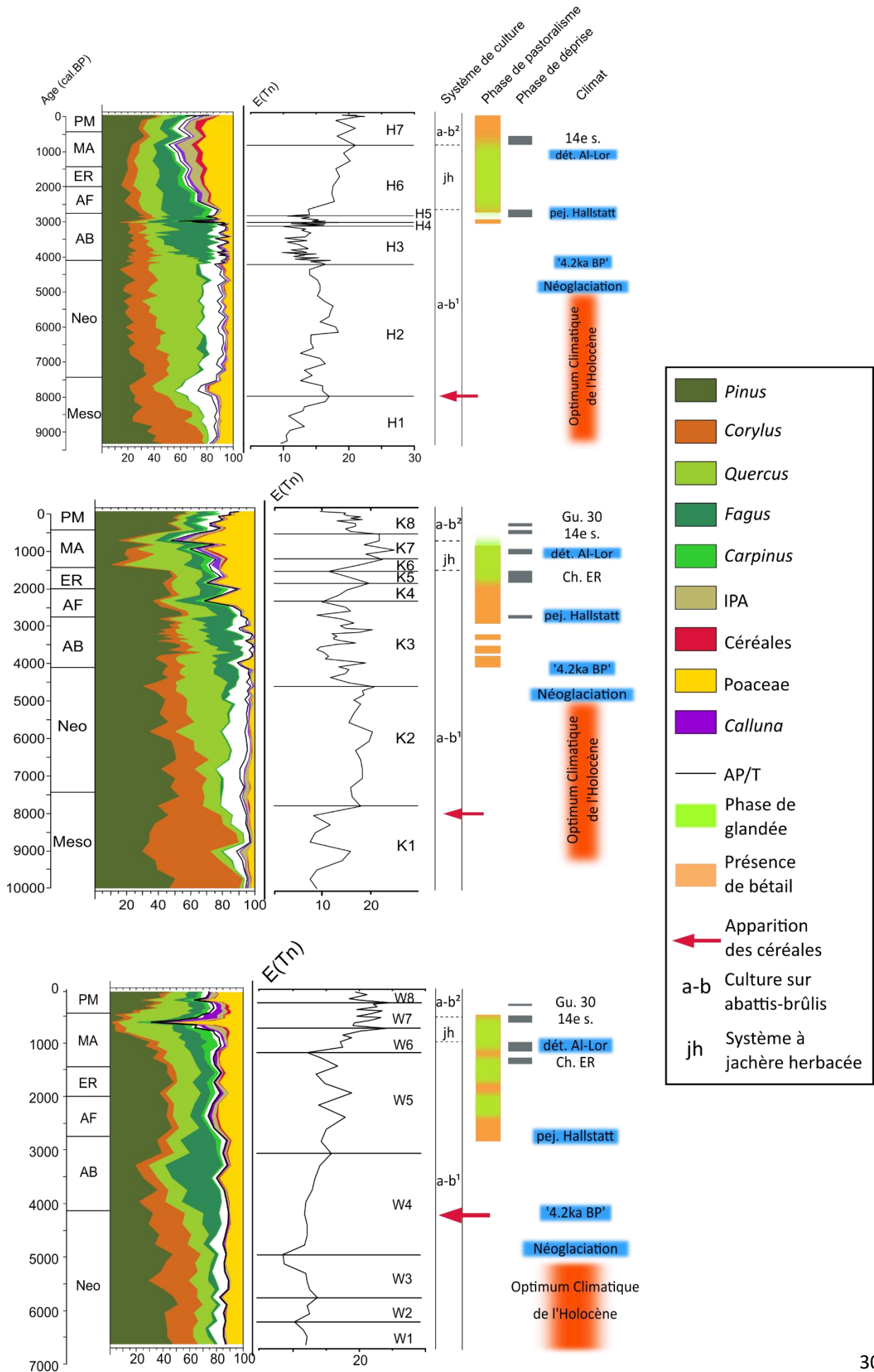
Après que le maximum de diversité floristique du Moyen Âge ait été atteint, celle-ci a tendance à osciller autour d'une valeur moyenne élevée (H6, W7, K7) mais n'augmente plus. Ces oscillations observées pour les périodes récentes, peuvent s'expliquer par l'alternance de phases d'abandon et d'occupation comme c'est le cas aux XIV^{ème} et XVII^{ème} siècles suite aux conflits, épidémies et instabilité politique. Une autre hypothèse pouvant expliquer les diminutions observées au cours de ces phases d'oscillation est celle de la « perturbation intermédiaire » (BIRKS & LINE, 1992). D'après cette hypothèse, les activités humaines entraînent une augmentation de la diversité floristique tant qu'elles limitent la domination d'une espèce sans pour autant causer la disparition d'autres espèces. Lorsque la pression anthropique devient trop importante, elle risque d'engendrer la disparition de certaines espèces et donc de diminuer la diversité floristique.

Enfin, le sommet des séquences de KOH (K8) et de WAL (W8) montrent que le retour de la forêt avec le fort développement de l'épicéa et du pin, qui domine à nouveau le paysage, induisent une diminution de la diversité floristique et une homogénéisation du paysage.

¹³ Espèce végétale indigène à une région dont la propagation à une station nouvelle, son maintien et son extension sont favorisés par l'activité humaine (DA LAGE & METAILIE, 2015)

L'intensification de l'utilisation du paysage au cours du temps a donc mené à une diversification floristique, en induisant un paysage hétérogène. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'elle a également certainement engendré la disparition de certaines espèces végétales, que le niveau d'identification pollinique ne permet en revanche pas de mettre en évidence. De plus, des formations végétales, dominées par une espèce principale arborée, produisent une pluie pollinique peu diversifiée mais peuvent constituer des formations d'intérêt écologique, comme c'est le cas pour les aulnaies marécageuses, qui ont été fortement exploitées dans le Pays de Bitche, où elles sont de nos jours protégées.

Figure VI.3-1 : (page suivante) Comparaison des courbes de richesse pollinique attendue (E(Tn)), des principales phases d'activités agro-pastorales et des principaux changements climatiques et des dans les trois sites du Pays de Bitche (PM : période moderne, MA : Moyen Âge, ER : époque romaine, AF : âge du Fer, AB : âge du Bronze, Neo : Néolithique, Meso : Mésolithique, a-b : système agraire sur abattis-brûlis, jh : système agraire à jachères herbacées, Gu. 30 : Guerre de Trente Ans, 14^e s. : Guerre de Cent Ans et épidémie de peste noire, dét. Al-Lo : détérioration climatique en Alsace-Lorraine, Ch. ER : chute de l'Empire Romain, péj. Hallstatt : péjoration climatique de l'Hallstatt, 4.2 ka BP : événement climatique de 4200 cal. BP)



Conclusion générale



E. Gouriveau

Highland cattle pâturant dans un pré des Vosges du Nord

1. Éléments de conclusion

Notre étude montre donc que la végétation des Vosges du Nord a suivi une dynamique assez similaire à celle observée pour l'Europe de l'Ouest avec successivement une phase dominée par le pin et le noisetier qui marque le début des séquences et dure jusqu'à 8000 cal. BP environ, à laquelle succède la phase de la chênaie diversifiée, dominée par le chêne et dans laquelle le noisetier est encore bien présent, puis vers 4500 cal. BP, le hêtre se propage au détriment des essences de la chênaie. La dernière essence à atteindre les Vosges du Nord est le charme qui se développe à partir de 3000 cal. BP. Contrairement aux conclusions de HATT (1937), la phase de chênaie diversifiée est assez clairement identifiée (à l'exception du site de Waldeck), même si, comme le notaient les anciennes analyses, le pin reste largement présent, voire dominant, tout au long des séquences, surtout à l'est du Pays de Bitche. Cette persistance du pin apparaît comme une particularité de l'histoire de la végétation des Vosges du Nord, où cette essence est favorisée par les conditions édaphiques.

La succession de ces grandes phases de végétation a été conditionnée par les changements climatiques de l'Holocène et constitue l'évolution « naturelle » du paysage. Ainsi, le développement de la chênaie diversifiée est lié à la mise en place du climat plus favorable de l'Optimum Climatique de l'Holocène à partir de 9000 cal. BP et la propagation du hêtre est contemporain du début de la Néoglaciation (5000 cal. BP).

Dans ce contexte de dynamique naturelle de la végétation, les premières traces de présence humaines remontent au Néolithique initial (8000 cal. BP) avec l'identification des premiers impacts sur la forêt et les premières activités agropastorales. La pression anthropique sur le paysage s'est ensuite accentuée et diversifiée au cours du temps et principalement à partir de l'Âge du Fer puis au cours du Moyen Âge. Un gradient d'anthropisation est-ouest est mis en évidence dans le Pays de Bitche, depuis le pays découvert fortement anthropisé vers l'est du pays couvert où les premiers impacts significatifs et permanents remontent seulement au Moyen Âge. La région autour de Bitche se trouve dans une situation intermédiaire avec un impact continu du Néolithique jusqu'à l'époque moderne. De plus, les petites vallées de l'est du pays couvert ont plus souffert des périodes de conflits et d'épidémies qui ont très souvent été responsables de phases de migration des populations et

d'abandon des sites, à l'inverse de la région de Bitche qui n'a été que très rarement abandonnée.

Les pratiques agropastorales et notamment les systèmes agraires à jachères courtes herbacées, datant du Moyen Âge, ont induit une pression intense et permanente sur le paysage et sur l'écosystème forestier. Le maintien d'un milieu ouvert a engendré une légère perte de résilience des forêts qui reviennent lors des phases de diminution de la pression anthropique mais n'atteignent plus leur étendue antérieure à la perturbation. De plus, les activités humaines ont induit une modification de la composition des boisements avec notamment le maintien préférentiel du chêne pour la pratique de la grasse pâture, au détriment des autres essences et surtout du hêtre et du pin. Par la suite, la composition change à nouveau avec la modification de l'utilisation du paysage et l'abandon des pratiques agropastorales et des zones cultivées qui favorisent la propagation du pin et de l'épicéa. Concernant les activités métallurgiques et minières identifiées dans la région, bien que leur approvisionnement en combustible ne semble pas avoir réduit de manière significative les surfaces boisées du Pays de Bitche, leur impact sur l'état (rajeunissement des boisements par exemple) et la composition des forêts est difficilement perceptible via l'analyse pollinique.

De manière générale, les conclusions de cette étude ont mis en évidence le statut particulier de la forêt dans les Vosges du Nord. En effet, il est souvent admis que les forêts denses de cette région et son sol pauvre très peu favorable à la culture des céréales sont responsables de sa faible anthropisation, à l'inverse du pays découvert du Pays de Bitche. Mais l'étude des trois tourbières du pays couvert montre que les activités agropastorales étaient plus diversifiées et impactaient plus le paysage au cours des périodes anciennes qu'à l'époque moderne et que la forêt ne semblait pas constituer un obstacle à l'anthropisation mais faisait plutôt partie intégrante de l'écosystème cultivé. De plus, au cours de l'époque moderne, les croissances économique et industrielle de la région résultent de la présence des grandes surfaces boisées et de la volonté de les exploiter qui a attiré les industriels. Comme l'écrit C. LABRUE (2009, paragr. 11), « Bien avant de constituer le cadre de vie des habitants, [la forêt] est avant tout le motif de l'installation des hommes en son sein ». Pour l'époque moderne, le changement des pratiques lié à la déprise agricole et à l'affectation des forêts aux différentes industries (verrerie, forge, construction navale) puis le développement de la sylviculture ont mené à la mise en

place de mesures de protection des forêts et aux grandes plantations du XIX^{ème} siècle, engendrant un retour des arbres dans la région mais jamais aux pourcentages d'origine.

A l'échelle des zones humides, bien que les changements climatiques et/ou les impacts anthropiques et particulièrement les activités pastorales aient fait disparaître les aulnaies marécageuses dans les sites étudiés, la création d'étangs médiévaux a entraîné dans deux d'entre eux une diversification des taxons identifiés et la mise en place, par le processus d'atterrissement, d'un milieu particulier où l'on trouve de nos jours des espèces remarquables et patrimoniales autant floristiques (comme les *Drosera*) que faunistiques (libellules, amphibiens...). Il est intéressant de noter que ces étangs-tourbières, issus des pratiques humaines médiévales, sont actuellement presque tous protégés dans la Réserve naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche (DUCHAMP, 2004). De même, la diversification des pratiques agropastorales a engendré une augmentation de la diversité floristique au cours du temps et il est intéressant de noter, là encore, que l'un des objectifs du plan de gestion du PNR des Vosges du Nord est de « maintenir les prairies permanentes (...) et leur diversité », qui, d'après la reconstitution des pratiques humaines dans le Pays de Bitche menée dans cette thèse, remontent à l'âge du Fer. Pour ce faire, des pratiques agropastorales ancestrales, déjà perçues dans les données paléoécologiques à l'âge du Fer, sont rétablies dans ces milieux, comme la fauche ou le pâturage. Ces observations montrent bien que conserver la biodiversité ne signifie pas toujours conserver un habitat naturel mais également perpétuer des éléments du patrimoine culturel, matériel ou immatériel.

L'étude de la résilience des écosystèmes face aux activités humaines s'est avérée délicate. Bien que l'on ait pu percevoir la résilience de la forêt au cours du Néolithique lorsque l'agriculture était itinérante, la résilience est difficile à appréhender à partir de l'âge du Fer lorsque la pression anthropique sur le paysage et les écosystèmes est devenue continue et que les activités se sont diversifiées au cours du temps. Cette pression anthropique n'a été réduite que de manière temporaire ne permettant pas d'appréhender la réponse des écosystèmes après l'arrêt de la perturbation. Même si, à l'époque moderne, la pression agro-pastorale diminue dans les Vosges du Nord, l'écosystème fait l'objet d'une nouvelle gestion anthropique.

Cependant, bien que la réponse des écosystèmes face aux perturbations humaines est difficile à percevoir, notre étude a permis de reconstituer l'évolution des paysages et des

écosystèmes au cours du temps et a mis en évidence l'existence d'un héritage complexe résultant des nombreuses activités humaines.

De plus, notre étude montre bien l'apport des analyses paléoécologiques multi-proxy à la biologie de la conservation et à la mise en place de politiques de gestion des paysages et des écosystèmes. Deux cas sont particulièrement intéressants : le statut indigène de l'épicéa et le comportement du hêtre face aux changements climatiques. En effet, nous avons vu que le statut indigène de l'épicéa dans les Vosges du Nord est largement discuté et qu'il est de nos jours plutôt considéré comme une espèce introduite par l'homme lors des plantations du XIX^{ème} siècle. Ainsi, au sein du Parc naturel régional des Vosges du Nord et de la Réserve naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche, l'épicéa est considéré comme une essence exotique et les plans de gestion et les chartes définissent comme objectif de « restaurer la naturalité du milieu en extrayant les résineux allochtones introduits sur le site [tourbière de l'Erlenmoos] (Douglas, Pin Weymouth, Epicéa, Thuya) » ou encore de « Poursuivre l'élimination par abatage, annelage ou arrachage des individus d'essences exogènes indésirables (Pin Weymouth, Epicéa, Douglas, Thuya géant, etc.) » (PNR VOSGES DU NORD, 2014 ; RNN DES ROCHERS ET TOURBIERES DU PAYS DE BITCHE, 2018). Cependant, nos analyses montrent la présence ancienne de pollens d'épicéa, et même si sa présence locale depuis 8000 cal. BP est difficile à affirmer à cause du biais de représentation pollinique de l'espèce, elle est certaine à partir de la fin du VII^{ème} siècle ap. J.-C. autour de Bitche et du XV^{ème} siècle vers Sturzelbronn, donc longtemps avant les plantations du XIX^{ème} siècle. Bien que l'on ne puisse pas exclure une introduction précoce à l'échelle locale, celle-ci serait alors inconnue et n'aurait jamais été documentée dans les écrits de l'époque. Ces résultats montrent donc que l'épicéa ne serait pas une espèce introduite au XIX^{ème} siècle par l'homme mais plutôt une essence apparue tardivement dans les forêts des Vosges du Nord.

Cette conclusion souligne l'importance de la prise en compte des analyses paléoécologiques pour identifier le statut indigène d'une espèce, d'autant plus lorsque l'on se trouve, comme c'est le cas ici, à la limite de son aire de répartition naturelle, qui est souvent utilisée pour définir ce statut (BIRKS, 2012 ; FOSTER *et al.*, 2003 ; WILLIS & BIRKS, 2006).

Cependant, l'épicéa, tout comme le pin, a profité de la diminution de la pression agricole pour recoloniser les terres abandonnées, grâce à son comportement héliophile et ses exigences écologiques adaptées aux conditions climatiques et édaphiques des fonds des « cuvettes » du

Pays de Bitche. L'impact humain aurait donc constitué l'un des moteurs de la propagation de l'épicéa dans les Vosges du Nord en diminuant la compétition entre ce dernier et les essences déjà implantées. Ainsi, même s'il s'est dans un premier temps propagé « naturellement », sans aide humaine, sa diffusion a été une conséquence indirecte des activités humaines, puis une conséquence directe des grandes plantations – dont résultent sa répartition actuelle –, ce qui rend son statut particulièrement difficile à établir dans la mise en place d'un plan de gestion.

Une autre observation intéressante est le comportement du hêtre qui est très lié aux variations climatiques. En effet, il se propage dans un premier temps à la fin de l'Optimum Climatique de l'Holocène, lorsque le climat devient plus humide et il fait toujours partie des essences qui se redéveloppent lors des phases de déprises anthropiques liées aux péjorations climatiques. A l'inverse, il régresse de manière impressionnante autour de 3000 cal. BP lorsque les conditions climatiques évoluent vers une période plus chaude et moins humides. Ces observations sont cohérentes avec les exigences du hêtre, qui nécessite plus de 750 mm de précipitations annuelles et une humidité atmosphérique élevée, et elles mettent en évidence sa grande sensibilité aux fluctuations de ces variables climatiques, auxquelles il répond rapidement. Cette vulnérabilité du hêtre face aux sécheresses est importante dans le contexte actuel du changement climatique et corrobore bien les modélisations de la propagation future du hêtre en réponse à l'augmentation des températures (LANDMANN *et al.*, 2007).

2. Perspectives

Au cours de cette étude, l'absence d'un référentiel pollinique actuel a constitué une limite dans la reconstitution précise des interactions homme-milieu et plus particulièrement dans l'identification des impacts des activités humaines. L'étude de la pluie pollinique actuelle réalisée sur le contenu sporo-pollinique de coussinets de mousse sur des transects de végétation et dans des formations végétales bien caractérisées, permettrait une reconstitution fine de l'image pollinique des différents milieux et permettrait de caractériser les biais de représentation des différents taxons dans les spectres polliniques. Cela serait par exemple nécessaire pour tenter de répondre à la problématique de la répartition est/ouest du chêne et du hêtre dans le Pays de Bitche. De plus, l'identification de plantes spécifiques des milieux anthropisés actuels et leur représentation dans la pluie pollinique permettraient de mettre en

évidence les taxons polliniques d'anthropisation spécifiques de la région des Vosges du Nord et d'affiner la reconstitution des pratiques passées via les analyses polliniques.

De même, augmenter la résolution de l'identification pollinique au sein des grandes familles, en utilisant, par exemple, les types polliniques établit par BEUG (2004), offrirait une meilleure caractérisation floristique des écosystèmes passés, permettrait d'affiner les reconstitutions des conditions écologiques et ainsi de faciliter les comparaisons avec les formations végétales actuelles (WILLIS & BIRKS, 2006).

Afin de confirmer les hypothèses issues de l'analyse géochimique par fluorescence des rayons X (XRF), qui offre un bon aperçu de la composition du sédiment mais qui est uniquement semi-quantitative, il est nécessaire de réaliser des analyses géochimiques quantitatives. La mise en place de ces analyses est actuellement en cours.

L'étude des éléments traces métalliques, tels que le plomb, le cuivre, le zinc, le cadmium ou l'arsenic, permettrait ainsi de tracer l'histoire des émissions atmosphériques liées aux activités humaines. De plus, l'étude des isotopes du plomb permettraient de connaître la part de la fraction totale du Pb d'origine anthropique et de tracer, par comparaison avec les signatures isotopiques de différents minerais, dont celui présent dans les Vosges du Nord, la source de ces émissions. Les prospections réalisées par J.-F. Kraft à la recherche de bas-fourneaux dans les Vosges du Nord et la thèse de F. Magar (en cours à l'UHA, sous la direction de Pierre Fluck et de Jean-Jacques Schwien) sur « la métallurgie du fer dans le Bas-Rhin, des bas fourneaux aux premiers hauts fourneaux » apporteront également des informations indispensables à la reconstitution de l'histoire locale des anciennes phases de métallurgie dans les Vosges du Nord.

Afin de compléter la reconstitution de l'impact des industries sur la végétation des Vosges du Nord, il serait nécessaire de conduire des analyses au plus près des sites industriels, comme par exemple dans la région de Mouterhouse ou dans la vallée de la Zinsel du Nord où ont été réalisées les analyses anthracologiques des anciennes plateformes charbonnières (GOCEL-CHALTE *et al.*, 2020). L'exploitation des résultats concernant la séquence prélevée dans la bétulaie tourbeuse de Bitscherthal permettraient de combler cette lacune mais cela nécessite une étude plus approfondie de la séquence et notamment des datations supplémentaires afin de vérifier les datations déjà obtenues et de confirmer, ou non, de potentiels problèmes de remaniement, non visibles dans les spectres polliniques, plutôt cohérents avec ceux des autres

séquences. Une autre séquence, prélevée dans les environs de Mouterhouse, au Grand étang de Baerenthal (à moins 3 km à l'est du village de Mouterhouse) pourrait, elle aussi, livrer des informations intéressantes. Il serait également nécessaire, pour compléter l'éventail des activités humaines, de trouver une zone humide à proximité des verreries, au sud du Pays de Bitche (Meisenthal, Saint-Louis-lès-Bitche, Wingen-sur-Moder...). De plus, l'impact des activités militaires n'a pas pu être étudié dans cette thèse mais l'étude d'une séquence prélevée dans le Camp militaire de Bitche est en cours dans le cadre de l'Observatoire Hommes-Milieus "Mémoire et rôle environnemental des tourbières du camp militaire de Bitche. Analyse interdisciplinaire de séquences de tourbe" porté par Benjamin Cancès (GEGENA, Université de Reims) en collaboration avec le LIEC (Université de Lorraine).

Bien que cette thèse ait pour zone d'étude les Vosges du Nord, elle n'a pu être menée uniquement dans des tourbières du pays couvert du Pays de Bitche. Il serait alors intéressant d'élargir la zone étudiée et, par exemple, réaliser des analyses dans le pays découvert, ce qui permettrait de comprendre et de dater la mise en place des deux entités du Pays de Bitche. Malheureusement, les prospections dans cette région n'ont jusqu'à présent pas permis d'identifier de zones humides exploitables.

Il serait également intéressant de mener des analyses similaires à celles présentées dans cette étude sur le versant alsacien des Vosges du Nord, voire au pied du massif, afin d'obtenir une histoire de la végétation et des interactions homme-milieu-climat à l'échelle du Parc naturel régional des Vosges du Nord et également de se rapprocher des grands sites métallurgiques de l'entreprise de Dietrich (Niederbronn, Reishchoffen...). De plus, nous avons abordé dans la présentation du contexte historique la difficulté à reconstituer l'histoire plurielle des Vosges du Nord, qui n'ont pas constitué et ne constituent pas une entité historique et administrative unique. Ainsi, comparer l'histoire des implantations humaines sur les deux versants donnerait l'occasion de mieux cerner l'histoire de cette région complexe.

Afin d'affiner la reconstitution de la végétation et notamment celle des tourbières, l'étude des macrofossiles (feuilles de mousses, restes d'herbacées et de petits arbustes, ...) pourrait apporter des informations sur les plantes présentes localement, et ce, à un niveau taxonomique plus précis que celui atteint par la palynologie. De plus, l'étude des restes carpologiques présents dans les refus de tamis de très petit volume de sédiment (1 cm³) a montré l'intérêt de ces analyses pour la reconstitution de la végétation des zones humides. Réaliser ces études sur

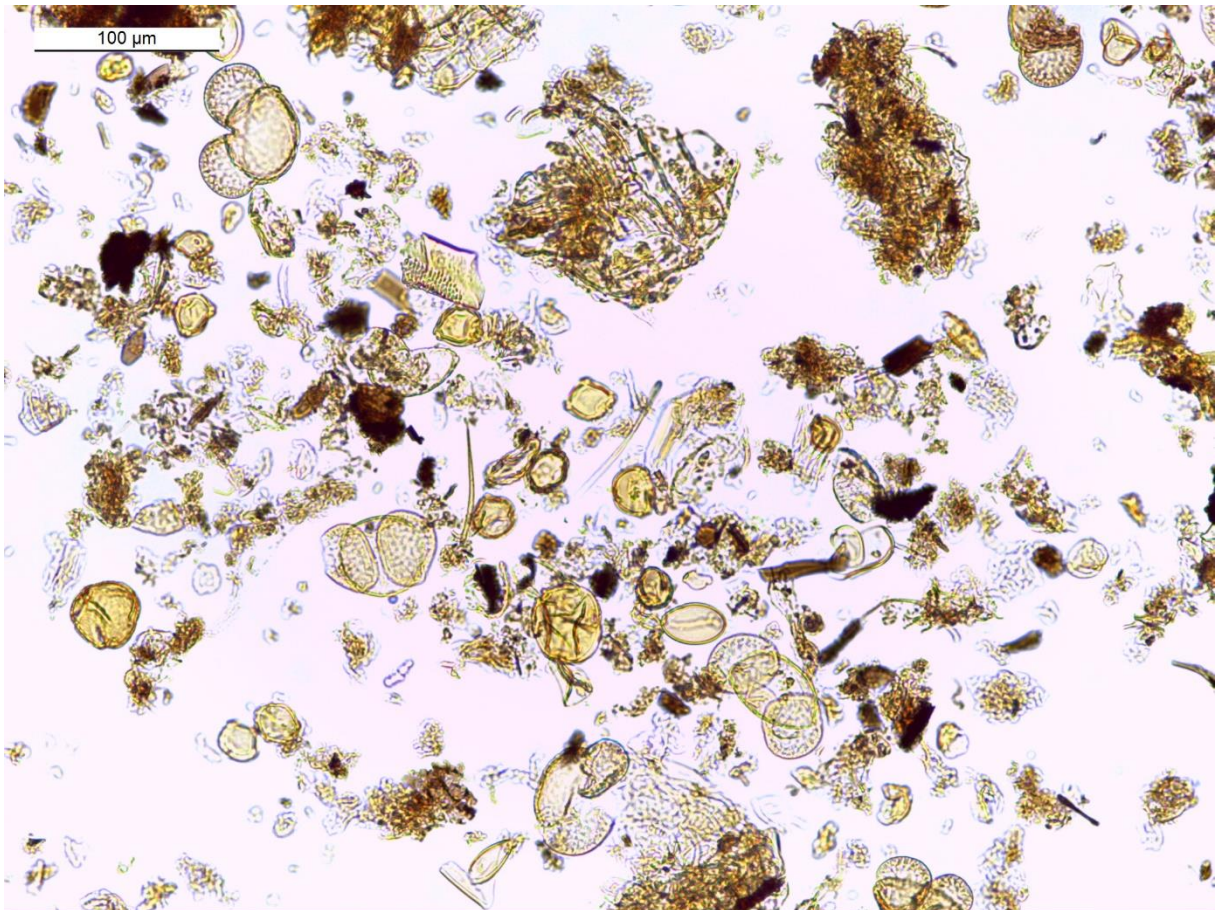
un volume de tourbe plus important permettrait d'améliorer l'image de la végétation locale et donc l'évolution de la zone humide.

De plus, l'étude préliminaire des diatomées, réalisée sur la séquence de Waldeck, a révélé leur présence en grand nombre et une diversité intéressante. Leur étude approfondie apporterait des informations précises sur les conditions écologiques, et notamment les conditions hydriques, des zones humides. D'autres études de la tourbe, comme l'analyse du carbone organique, de l'azote total et du rapport C/N permettrait d'affiner l'évolution des tourbières en donnant des informations sur le type de tourbe et son stade de minéralisation.

Il serait également intéressant de tester la présence de tests d'amibes dans la tourbe, car ceux-ci pourraient apporter des informations sur les conditions climatiques locales. Cette étude peut aussi fournir de nouvelles informations concernant les impacts humains sur les zones humides, notamment sur leur fonctionnement hydrologique.

Cette thèse dresse donc un premier tableau de l'histoire de la végétation et des impacts des sociétés et de leur histoire dans les Vosges du Nord, et plus particulièrement dans le Pays de Bitche qui apparaît comme une région anciennement peuplée, dans laquelle le rôle joué par les forêts est immense et explique leur présence sur les deux tiers du territoire. En plus de combler en partie les lacunes concernant l'histoire de l'occupation humaine dans la région depuis le Mésolithique, elle fournit également des informations utiles à la compréhension des écosystèmes actuels et la valorisation des paysages, qui apparaissent alors comme un patrimoine naturel et culturel.

Annexes

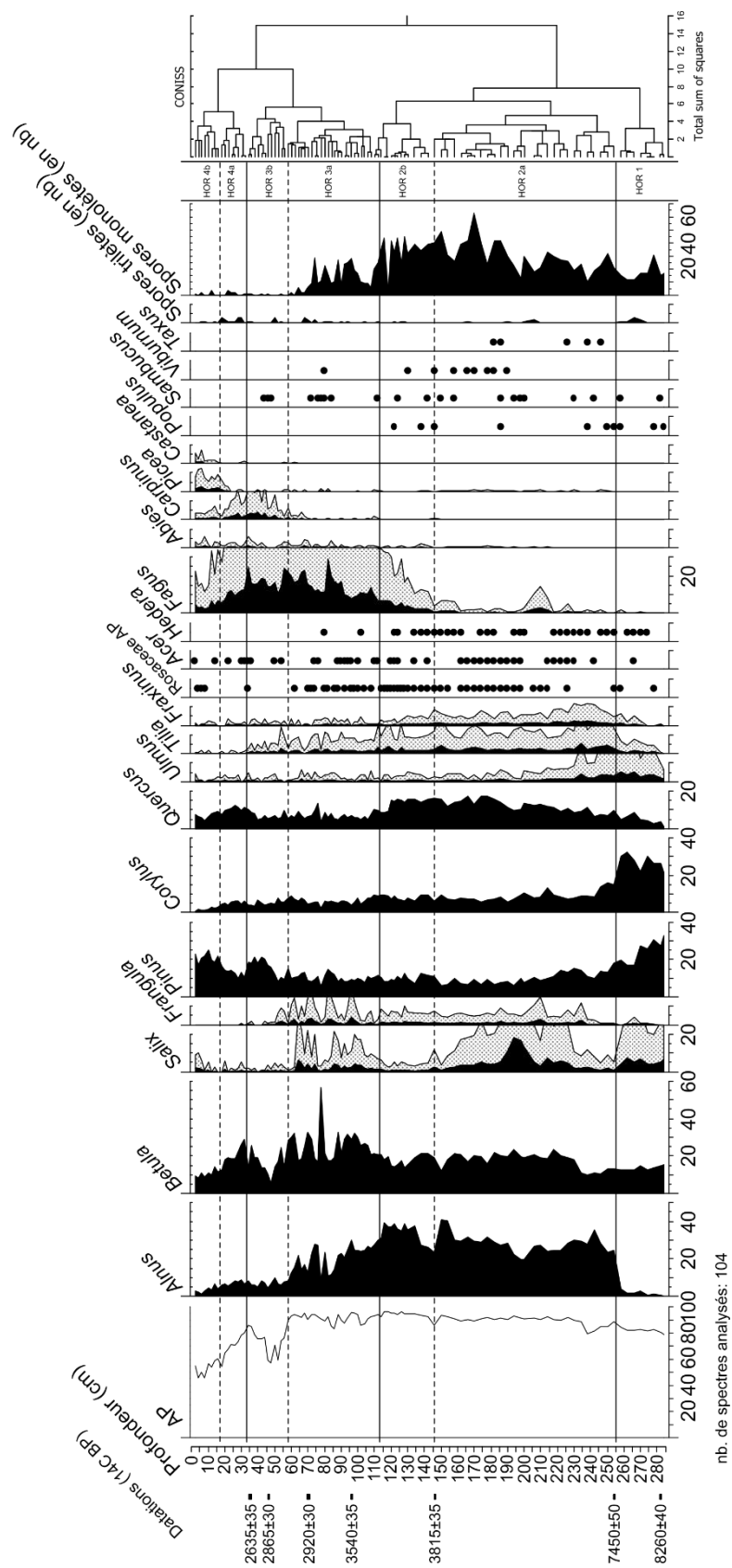


Grains de pollen au microscope optique

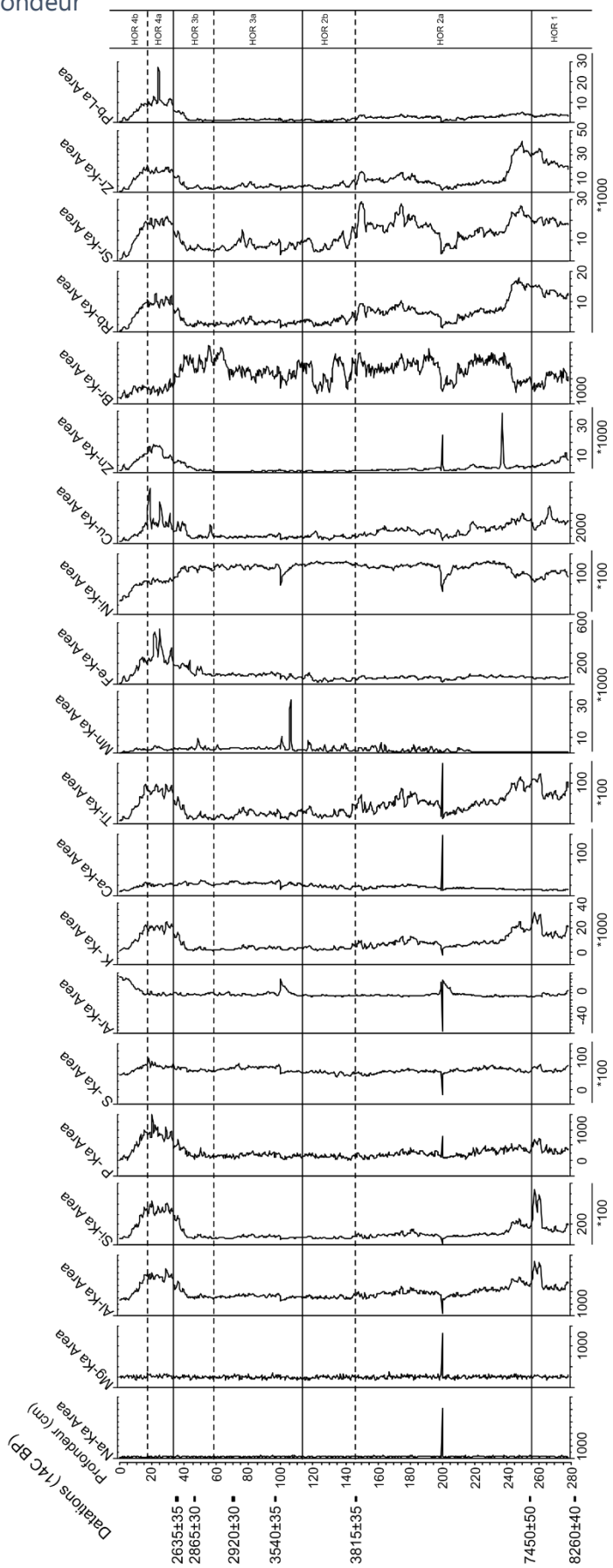
Annexe 1 : Correspondance nom scientifique/nom vernaculaire des taxons cités (Tous les taxons sont des types polliniques identifiés dans l'étude, à l'exception des taxons indiqués par une *, qui sont observés dans la végétation actuelle.)

Taxons arboréens			
Nom scientifique	Nom vernaculaire	Nom scientifique	Nom vernaculaire
<i>Abies</i>	Sapin	<i>Juglans</i>	Noyer
<i>Alnus</i>	Aulne	<i>Picea</i>	Épicea
<i>Betula</i>	Bouleau	<i>Pinus</i>	Pin
<i>Carpinus</i>	Charme	<i>Quercus</i>	Chêne
<i>Castanea</i>	Châtaignier	Rosaceae AP (arbre)	Sorbier...
<i>Corylus</i>	Noisetier	<i>Salix</i>	Saule
<i>Fagus</i>	Hêtre	<i>Tilia</i>	Tilleul
<i>Frangula</i>	Bourdaïne	<i>Ulmus</i>	Orme
<i>Fraxinus</i>	Frêne		
Taxons herbacés			
Nom scientifique	Nom vernaculaire	Nom scientifique	Nom vernaculaire
<i>Alisma</i>	Alisma, plantain d'eau, flûteau...	<i>Melampyrum</i>	Mélampyre
Anthemideae	Anthémidées	<i>Menyanthes trifoliata</i>	Trèfle d'eau
<i>Anthemis*</i>	Anthémis, camomille...	<i>Mercurialis</i>	Mercuriale
Apiaceae	Apiacées	<i>Myriophyllum</i>	Myriophylle
<i>Arnoseris minima*</i>	Arnoséris minime	<i>Nuphar</i>	Nénuphar
<i>Artemisia</i>	Armoise	<i>Nymphaea</i>	Nymphéa
Brassicaceae	Brassicacées	<i>Papaver</i>	Pavot, coquelicot
<i>Callitricha</i>	Callitriche	<i>Plantago lanceolata</i>	Plantain lancéolé
<i>Calluna</i>	Callune	<i>Plantago major/media</i>	Plantain majeur/moyen
<i>Cannabis/Humulus</i>	Chanvre/Houblon	Poaceae	Poacées
<i>Carex</i>	laïche	<i>Polygonum aviculare</i>	Renouée des oiseaux
<i>Centaurea cyanus</i>	Bleuet des champs	<i>Polygonum persicaria</i>	Renouée persicaire
<i>Centaurea jacea/nigra</i>	Centaurée jacée/noire	<i>Potamogeton</i>	Potamot
<i>Centaurea scabiosa</i>	Centaurée scabieuse	<i>Potamogeton natans*</i>	Potamot nageant
<i>Cerealia</i> -type	Céréales (sauf seigle)	<i>Potamogeton polygonifolius*</i>	Potamot à feuilles de renouée
Chenopodiaceae	Chénopodiacées	<i>Potentilla</i>	Potentille
Cichorioideae	Cichorioidées	Ranunculaceae	Renonculacées
<i>Cirsium oleraceum*</i>	Chardon des potagers	<i>Rhynchospora alba*</i>	Rhynchospore blanche
<i>Cirsium palustre*</i>	Cirse des marais	<i>Rumex</i>	Oseille, patience...
<i>Convolvulus</i>	Liseron	<i>Rumex acetosa*</i>	Grande oseille
<i>Crepis*</i>	Crépide	<i>Rumex acetosella*</i>	Petite oseille
Dipsacaceae	Dipsacacées	<i>Sanguisorba minor</i>	Petite pimprenelle
<i>Drosera</i>	Droséra ou Rossolis	<i>Scorzonera humilis*</i>	Petite scorsonère
<i>Equisetum</i>	Prêle	<i>Secale</i> -type	Seigle
Ericaceae	Ericacées	<i>Solanum nigrum</i>	Morelle noire
<i>Eriophorum vaginatum*</i>	Linaigrette vaginée	<i>Sphagnum</i>	Sphaigne
Fabaceae	Fabacées	<i>Typha latifolia</i>	Massette à feuilles larges
<i>Fagopyrum</i>	Sarrasin	<i>Typha/Sparganium</i>	Massette/Rubanier
<i>Filipendula</i>	Filipendule, Reine des prés...	Urticaceae	Urticacées
<i>Glyceria</i>	Glycérie	<i>Utricularia vulgaris</i>	Utriculaire commune
<i>Hydrocotyle</i>	Hydrocotyle	<i>Vitis</i>	Vigne
<i>Juncus</i> sp.*	Jonc		
<i>Lemna</i>	Lentille (d'eau)		
<i>Lysimachia</i>	Lysimaque		
<i>Lythrum</i>	Lythrum, salicaire...		

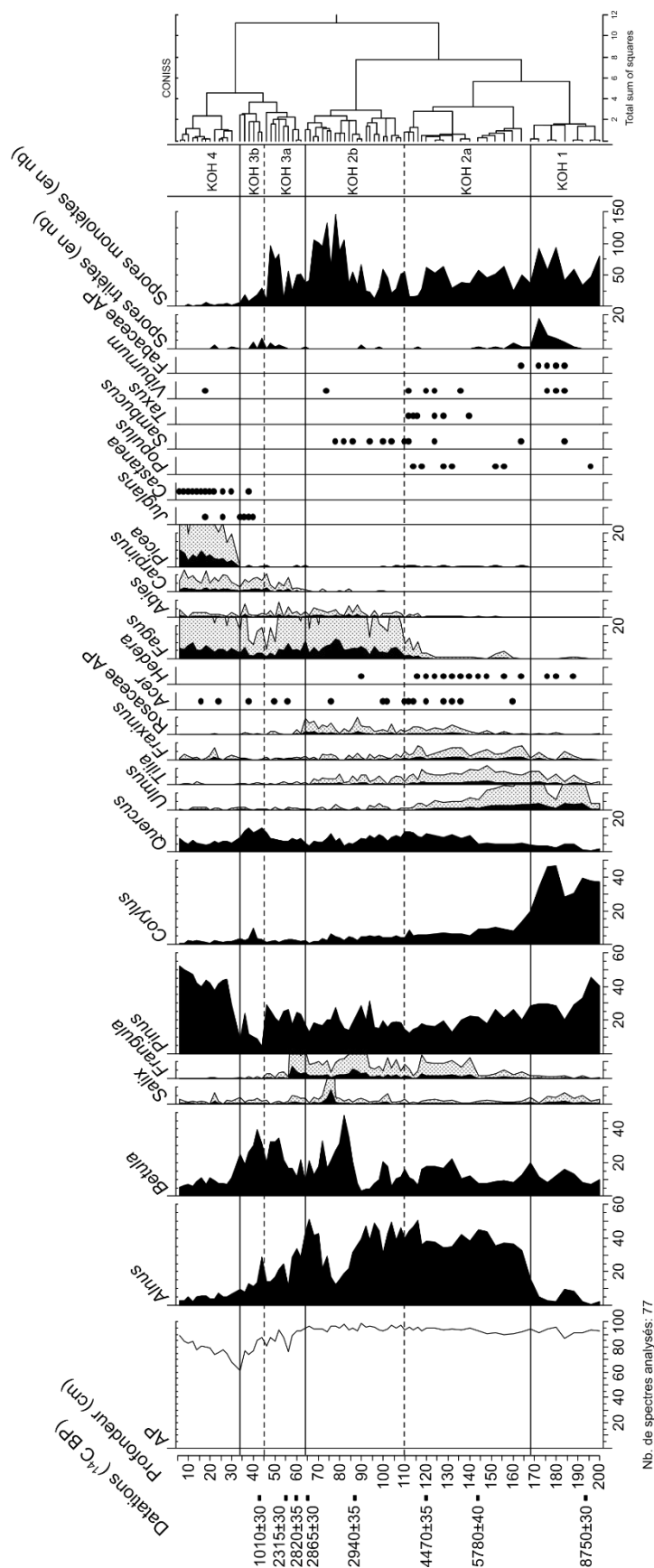
Annexe 2 : Diagramme pollinique brut complet des pollens d'arbres et arbustes (AP) de la séquence de la Horn en fonction de la profondeur (pourcentages calculés sur la somme pollinique total dont sont exclus les spores)



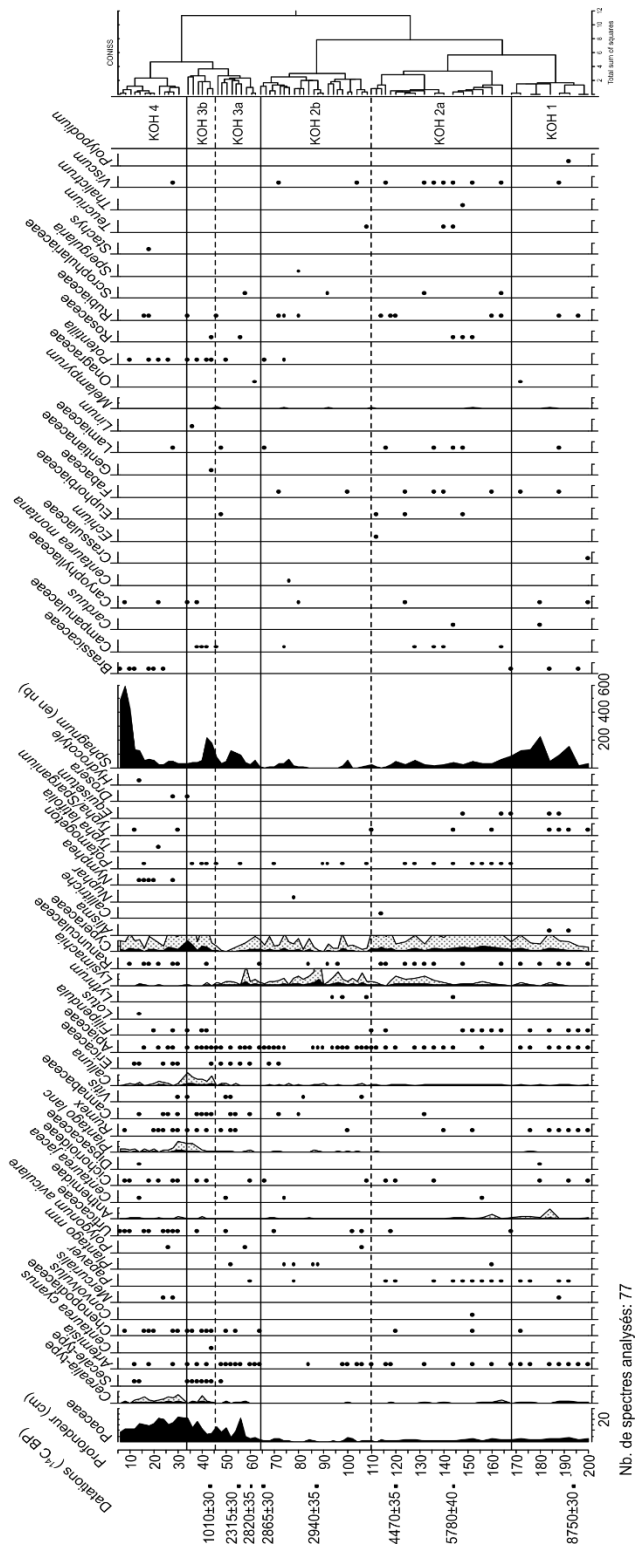
Annexe 4 : Résultats des analyses XRF pour la séquence de la Horn, en coups par seconde et en fonction de la profondeur



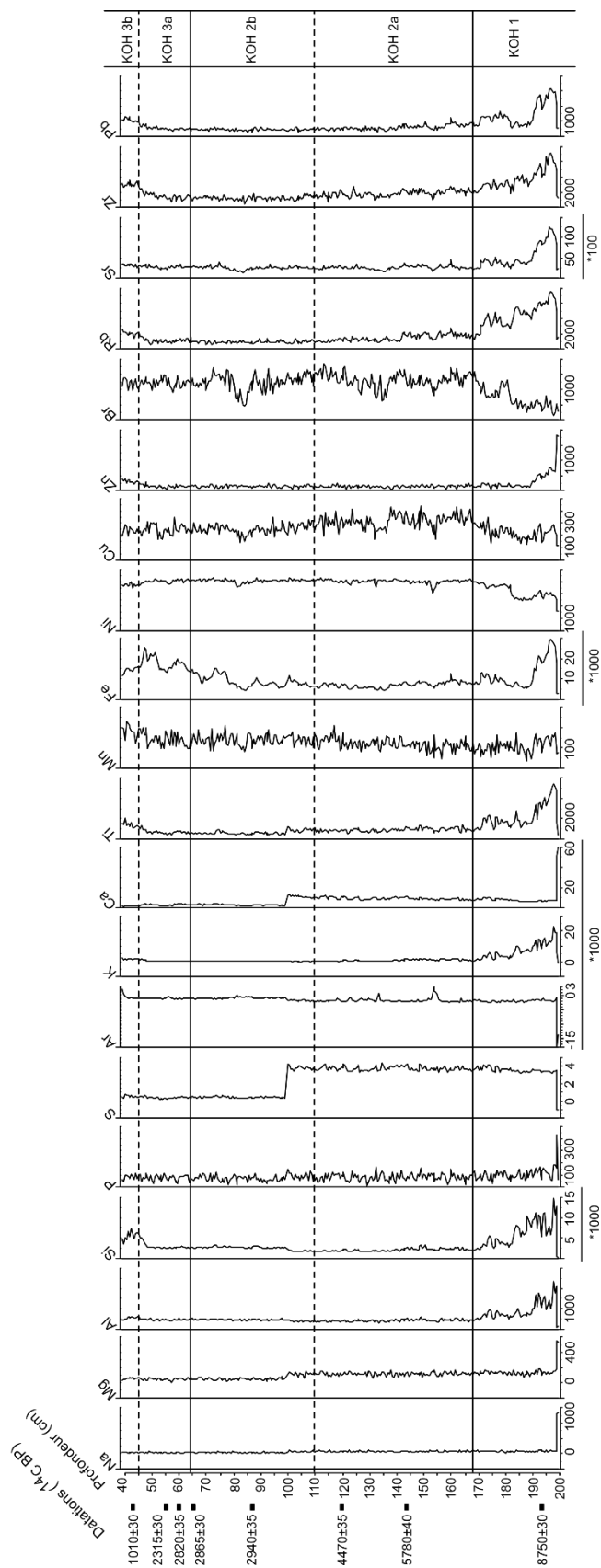
Annexe 5 : Diagramme pollinique brut complet des pollens d'arbres et arbustes (AP) de la séquence de Kobert-Haut en fonction de la profondeur (pourcentages calculés sur la somme pollinique total dont sont exclus les spores)



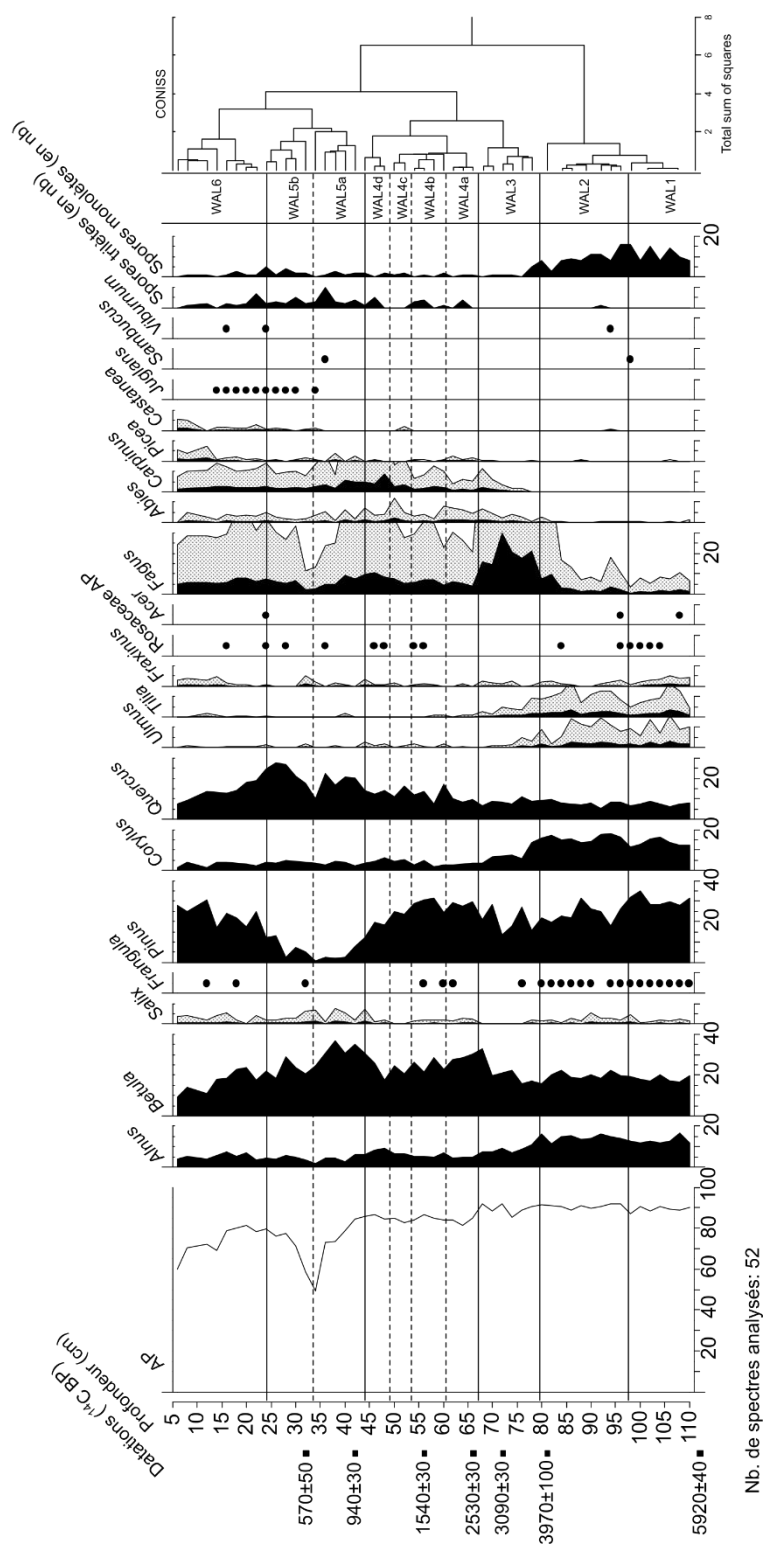
Annexe 6 : Diagramme pollinique brut complet des taxons herbacés (NAP) de la séquence de Kobert-Haut en fonction de la profondeur (pourcentages calculés sur la somme pollinique total dont sont exclus les spores)



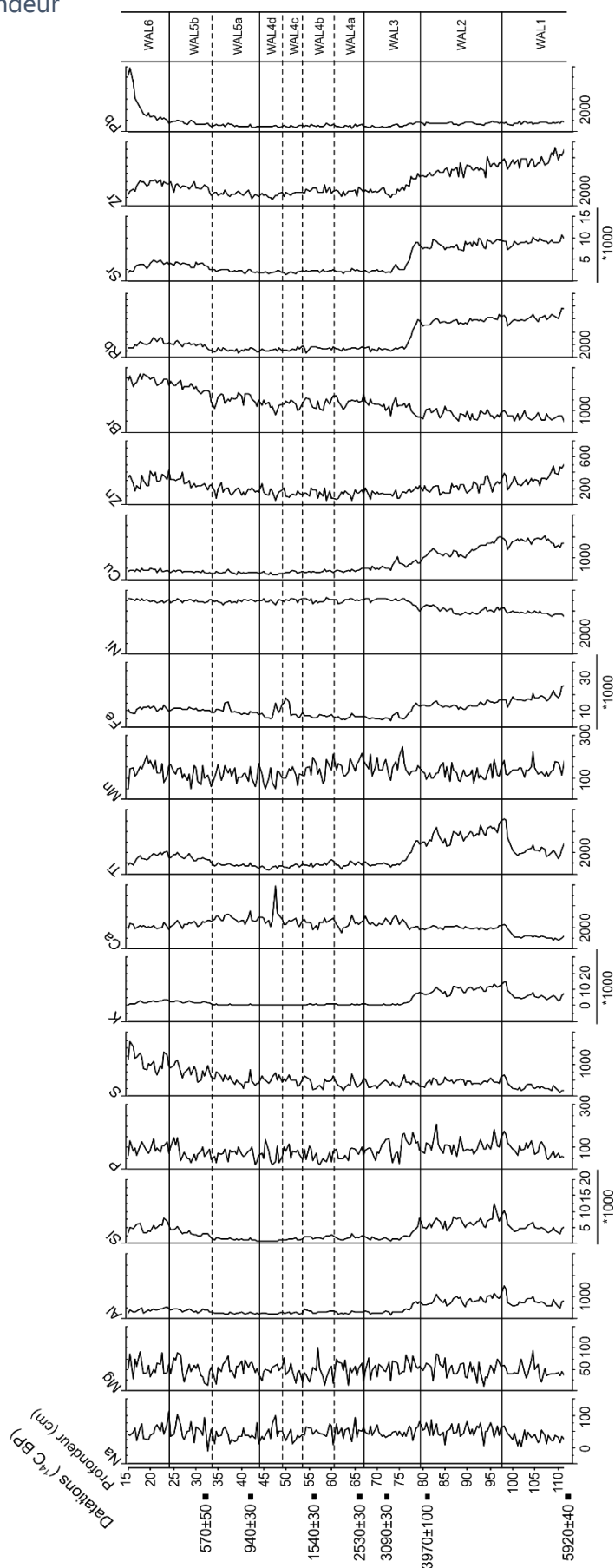
Annexe 7 : Résultats de l'analyse XRF de la séquence de Kobert-Haut en coups par seconde et en fonction de la profondeur



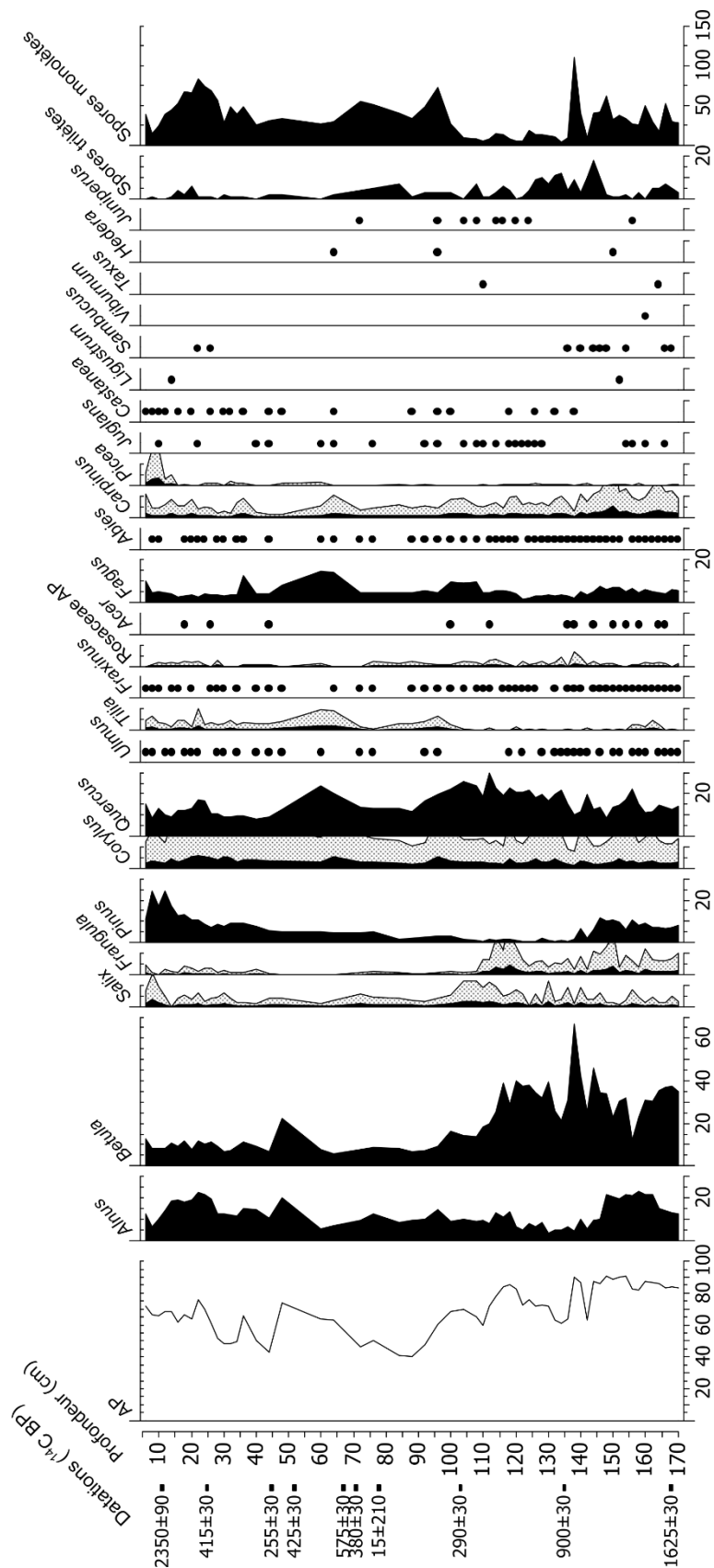
Annexe 8 : Diagramme pollinique brut complet des pollens d'arbres et d'arbustes (AP) de la séquence de Waldeck en fonction de la profondeur (pourcentages calculés sur la somme pollinique total dont sont exclus les spores)



Annexe 10 : Résultats de l'analyse XRF de la séquence de Waldeck en coups par seconde et en fonction de la profondeur

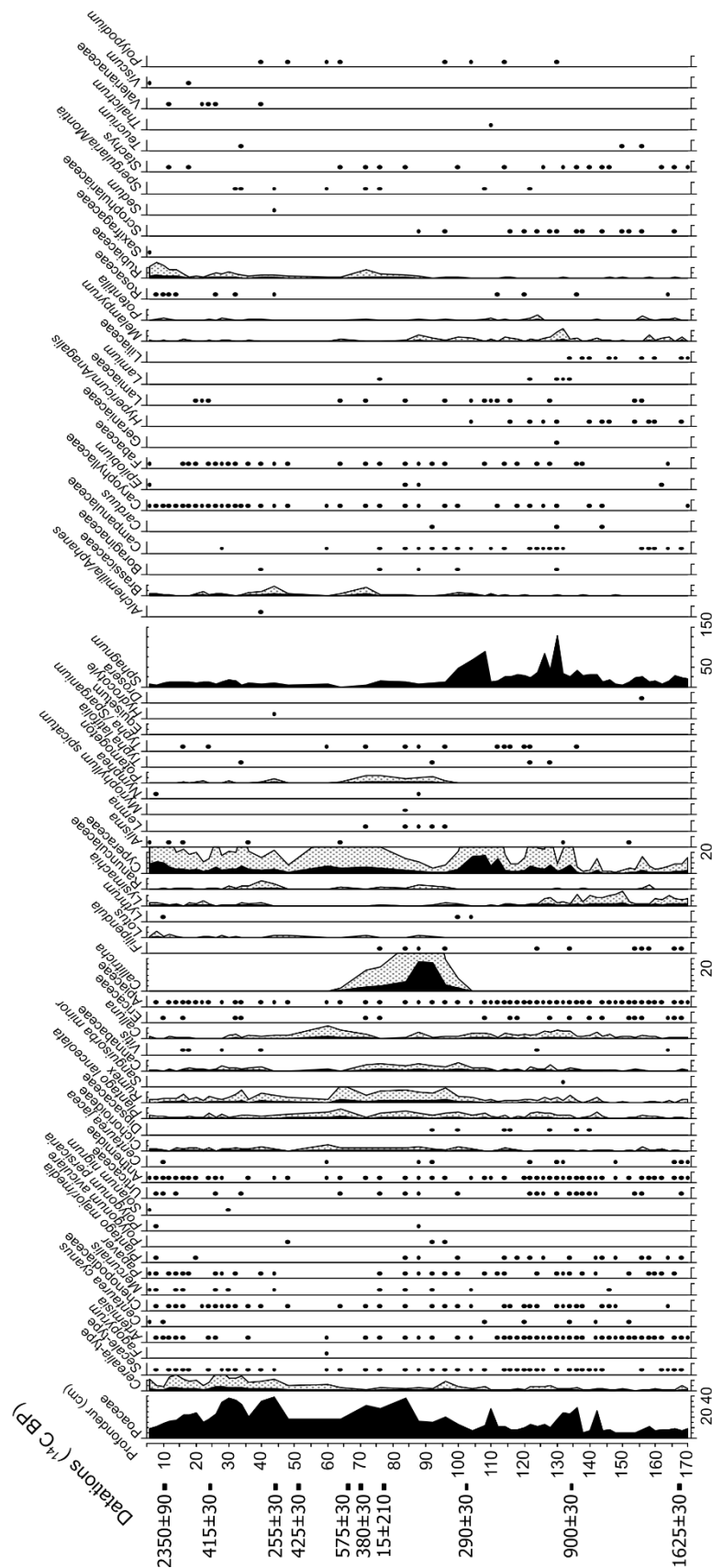


Annexe 11 : Diagramme pollinique brut complet des pollens d'arbres et d'arbustes (AP) de la séquence de Bitscherthal en fonction de la profondeur (pourcentages calculés sur la somme pollinique total dont sont exclus les spores)



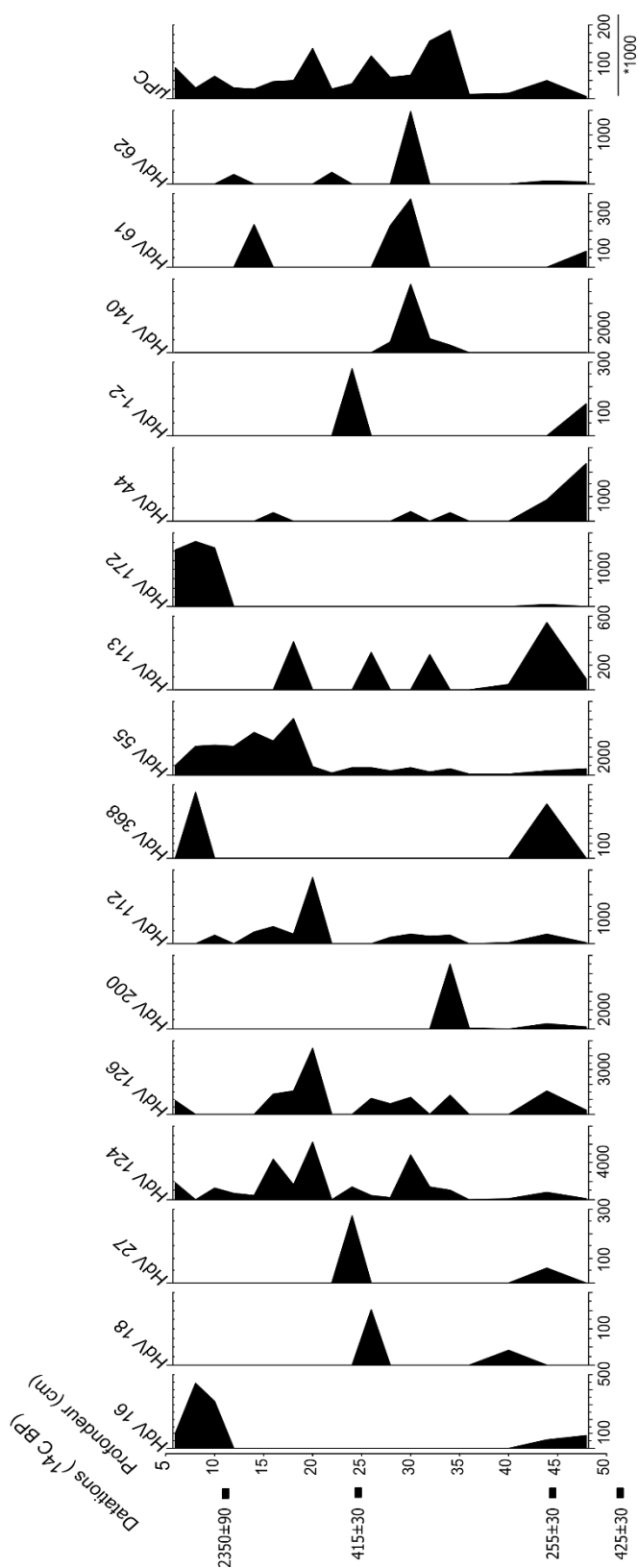
Nb. de spectres analysés : 61

Annexe 12 : Diagramme pollinique brut complet des pollens de taxons herbacés (NAP) de la séquence de Bitscherthal en fonction de la profondeur (pourcentages calculés sur la somme pollinique total dont sont exclus les spores)

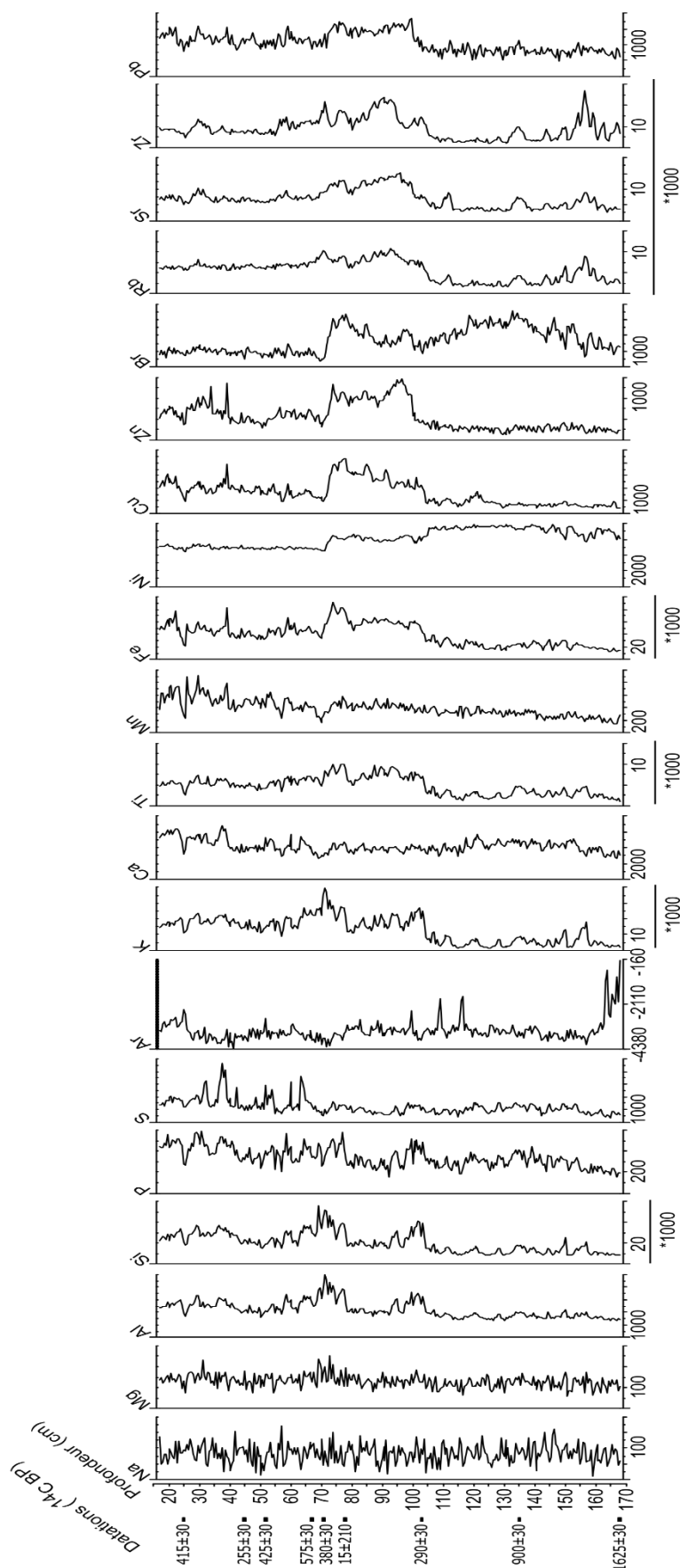


Nb. de spectres analysés : 61

Annexe 13 : Diagramme complet des différents microfossiles non-polliniques identifiés dans la séquence de Bitscherthal en fonction de la profondeur (en nb de MNP et de PC par gramme de sédiment)



Annexe 14 : Résultats de l'analyse XRF de la séquence de Bitscherthal en coups par seconde et en fonction de la profondeur



Bibliographie

Marion Gouriveau



« On apprend plus de choses dans les bois que dans les livres ; les arbres et les rochers vous enseigneront des choses que vous ne sauriez entendre ailleurs. » Bernard de Clairvaux (1090-1153)

- ANDRE G., ANDRE M., FERREZ Y., LACOMBE T. 2017. Les vignes sauvages colluviales *Vitis vinifera* subsp. *sylvestris* (Gmelin) Hegi dans le massif jurassien, nouvelles données. *Les Nouvelles Archives de la Flore jurassienne et du nord-est de la France* 15, 113-145.
- ARNAUD F. 2003. Signatures climatiques et anthropiques dans les sédiments holocènes des lacs du Bourget et d'Anterne (Nord-Ouest des Alpes) : paléohydrologie et contamination au plomb (These de doctorat). Lille 1, Lille.
- ARNOLD C. 2002. Ecologie de la vigne sauvage en Europe (*Vitis vinifera* L. ssp. *sylvestris*). *Matériaux pour le levé géobotanique de la Suisse* 76, 256 pp.
- BAJOUK T., GUILLAUMONT B., MICHEZ N., THOUIN B., CROGUENNEC C., POPULUS J., LOUVEL-GLASER J., GAUDILLAT V., CHEVALIER C., TOUROLLE J., HAMON D. 2015. Classification EUNIS, Système d'information européen sur la nature : Traduction française des habitats benthiques des Régions Atlantique et Méditerranée. Vol. 1. Habitats Littoraux.
- BAKER A.G., BHAGWAT S.A., WILLIS K.J. 2013. Do dung fungal spores make a good proxy for past distribution of large herbivores? *Quaternary Science Reviews* 62, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.018>
- BARNOSKY A.D., MATZKE N., TOMIYA S., WOGAN G.O.U., SWARTZ B., QUENTAL T.B., MARSHALL C., MCGUIRE J.L., LINDSEY E.L., MAGUIRE K.C., MERSEY B., FERRER E.A. 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471, 51-57.
- BARTHELMES A., DE KLERK P., PRAGER A., THEUERKAUF M., UNTERSEHER M., JOOSTEN H. 2012. Expanding NPP analysis to eutrophic and forested sites: Significance of NPPs in a Holocene wood peat section (NE Germany). *Review of Palaeobotany and Palynology* 186, 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2012.07.007>
- BAYEUR C., LORIDAT F., KLEIBER F., L'HOSPITALIER M., PLANTUREUX S. 2013. Typologie des prairies permanentes Vosges du Nord et Vosges mosellanes (Guide technique 2013). SYCOPARC, Université de Lorraine.
- BECK J.-S. 2011. 2000 ans de climat en Alsace et en Lorraine. Éd. Coprur, Strasbourg.
- BEGEOT C., DOYEN E. 2019. Rôle de l'homme et du climat sur la dynamique forestière des derniers millénaires à l'Ouest de l'Europe. *Revue scientifique Bourgogne-Franche-Comté Nature* 29, 207-213.
- BEGEOT C., RUFFALDI P., WALTER-SIMMONET A.-V., ETIENNE D., MARIET A.-L., GOURIVEAU E. 2019. Les Vosges : des forêts et des chaumes, in: BEPOIX, S., RICHARD, H. (Éd.), La forêt au Moyen Age. Les Belles Lettres, Paris, p. 301-314.
- BEHRE K.-E. 1981. The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et Spores* 23, 225-245.
- BEHRE K.-E. 1988. The rôle of man in European vegetation history, in: HUNTLEY, B., WEBB, T. (Éd.), *Vegetation History, Handbook of Vegetation Science*. Springer Netherlands, Dordrecht, p. 633-672. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3081-0_17

- BEHRE K.-E., JACOMET S. 1991. The ecological interpretation of archaeobotanical data, in: ZEIST, W. van, WASYLIKOWA, K., BEHRE, K.-E. (Éd.), *Progress in Old World palaeoethnobotany: a retrospective view on the occasion of 20 years of the International Work Group for Palaeoethnobotany*. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 81-108.
- BEHRE K.-E., 2007. Evidence for Mesolithic Agriculture in and around Central Europe? *Vegetation History and Archaeobotany* 16, 203-19. <https://doi.org/10.1007/s00334-006-0081-7>.
- BEIERLEIN C., LEPPERT R., STEINER A. s. d. Sturzelbronn (circuit de découverte).
- BENSETTITI F., BIORET F., ROLAND J., LACOSTE J.-P. 2004. « Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 2 - Habitats côtiers. MEDD/MAAPAR/MNHN. Éd. La Documentation française, Paris.
- BENSETTITI F., BOULLET V., CHAUAUDRET-LABORIE C., DENIAUD J. 2005. « Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 4 - Habitats agropastoraux. MEDD/MAAPAR/MNHN. Éd. La Documentation française, Paris.
- BENSETTITI F., GAUDILLAT V., HAURY J. 2002. « Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 3 - Habitats humides. MATE/MAP/MNHN. Éd. La Documentation française, Paris.
- BENSETTITI F., RAMEAU J.C., CHEVALLIER H. 2001. « Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 1 - Habitats forestiers. MATE/MAP/MNHN. Éd. La Documentation française, Paris.
- BERGLUND B.E., GAILLARD M.-J., BJÖRKMAN L., PERSSON T. 2008. Long-term changes in floristic diversity in southern Sweden: palynological richness, vegetation dynamics and land-use. *Vegetation History and Archaeobotany* 17, 573-583. <https://doi.org/10.1007/s00334-007-0094-x>
- BEUG H.J. 2004. Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiet, Pfeil. ed. München.
- BIRKS H.H., BIRKS H.J.B. 2006. Multi-proxy studies in palaeolimnology. *Vegetation History and Archaeobotany* 15, 235-251. <https://doi.org/10.1007/s00334-006-0066-6>
- BIRKS H.J.B. 2012. Ecological palaeoecology and conservation biology: controversies, challenges, and compromises. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management* 8, 292-304. <https://doi.org/10.1080/21513732.2012.701667>
- BIRKS H.J.B., LINE J.M. 1992. The use of Rarefaction Analysis for Estimating Palynological Richness from Quaternary Pollen-Analytical Data. *The Holocene* 2, 1-10. <https://doi.org/10.1177/095968369200200101>
- BLAAUW M. 2010. Methods and code for 'classical' age-modelling of radiocarbon sequences. *Quaternary Geochronology* 5, 512-518.

- BLANALT J.-G., SCHUMACHER E., WERVEKE L. van, GUILLAUME L., THÉOBALD N., BLANALT J.-G. 1967. Carte géologique détaillée de la France (1/50000), feuille Bitche-Walschbronn (167), Service de la carte géologique de la France. ed. Paris, France.
- BLOUET V., LANSIVAL R. 1993. Aux origines de la Lorraine rurale (de 6000 avant notre ère à l'an Mil), Editions Serpenoise. ed, Images du patrimoine. SRA de Lorraine, Metz, France.
- BOEUF R., SIMLER N., HOLVECK P., HUM P., CARTIER D., RITZ F., ROYER J.-M. 2014. Les végétations forestières d'Alsace. Vol.1, (Textes): référentiel des types forestiers du type générique au type élémentaire - relations entre les stations forestières, les communautés forestières, les habitats et les espèces végétales patrimoniales. Editions Scheuer, Drulingen, France.
- BONNAIRE E., WIETHOLD J. 2010. L'alimentation médiévale dans l'Est de la France à travers des études carpologiques de sites champenois et lorrains, in: CLAIRE, D., ISABELLE, T.-P., STEPHANIE, T. (Éd.), Des hommes et des plantes : exploitation du milieu et des ressources végétales de la Préhistoire à nos jours : actes des Rencontres 24-26 octobre 2009. Éd. APDCA, p. 161-192.
- BONNEL P., THOLOZAN A. 2007. Genèse et développement des tourbières du pays de Bitche dans les Vosges du Nord, in: CUBIZOLLE, H. (Éd.), Origine, fonctionnement et conservation des tourbières. Actes du colloque, Château de Goutelas, 5-7 octobre 2005. Publications de l'Université de Saint-Étienne, Saint-Etienne, p. 144-167.
- BOUGEL A. 2004. L'évolution des milieux forestiers du massif vosgien au fil des siècles, in: ROTHOT, J.-P., HUSSON, J.-P. (Éd.), Gérardmer, des forêts, des usines et des hommes : actes des Journées d'études vosgiennes, Gérardmer, 25 et 26 octobre 2003.
- BRADLEY R.S., BAKKE J. 2019. Is there evidence for a 4.2 ka BP event in the northern North Atlantic region? *Climate of the Past* 15, 1665-1676. <https://doi.org/10.5194/cp-15-1665-2019>
- BRADSHAW R.H.W., KITO N., GIESECKE T. 2010. Factors influencing the Holocene history of *Fagus*. *Forest Ecology and Management* 259, 2204-2212. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.035>
- BREITENLECHNER E., HILBER M., LUTZ J., KATHREIN Y., UNTERKIRCHER A., OEGGL K. 2010. The impact of mining activities on the environment reflected by pollen, charcoal and geochemical analyses. *Journal of Archaeological Science* 37, 1458-1467. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.006>
- BRIANE G., CAYSSIOLS N., GAZELLE F. 2003. La gestion des milieux humides et des tourbières par le pâturage. L'exemple du département de l'Aveyron. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest. Sud-Ouest Européen* 16, 61-73.
- BRONK RAMSEY C. 2009. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51, 337-360.
- BRUN C. 2007. Archéophytes et néophytes : pour une nouvelle détermination des marqueurs polliniques de l'anthropisation : le cas des milieux cultivés et rudéraux de Franche-Comté (These de doctorat). Université de Franche-Comté, Besançon.
- BÜNTGEN U., TEGEL W., NICOLUSSI K., MCCORMICK M., FRANK D., TROUET V., KAPLAN J.O., HERZIG F., HEUSSNER K.-U., WANNER H., LUTERBACHER J., ESPER J. 2011. 2500 Years of European Climate

Variability and Human Susceptibility. *Science* 331, 578-582.
<https://doi.org/10.1126/science.1197175>

BURNOUF J., ARRIBET-DEROIN D., DESACHY B., JOURNOT F., JAUBERT A.N. 2012. Manuel d'archéologie médiévale et moderne. Armand Colin, Paris, France.

CALCOTE R. 1998. Identifying forest stand types using pollen from forest hollows. *The Holocene* 8, 423-432. <https://doi.org/10.1191/095968398670894847>

CALCOTE R. 1995. Pollen Source Area and Pollen Productivity: Evidence from Forest Hollows. *Journal of Ecology* 83, 591-602. <https://doi.org/10.2307/2261627>

CAROZZA L., MARCIGNY C. 2007. L'âge du bronze en France. La Découverte, Paris, France.

CASELDINE C., HATTON J. 1993. The development of high moorland on Dartmoor: fire and the influence of Mesolithic activity on vegetation change, in: CHAMBERS, F.M. (Éd.), *Climate Change and Human Impact on the Landscape: Studies in Palaeoecology and Environmental Archaeology*. Springer Netherlands, Dordrecht, p. 119-131. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9176-3_11

CHAMBERS F.M., CHARMAN D.J. 2004. Holocene environmental change: contributions from the peatland archive. *The Holocene* 14, 1-6. <https://doi.org/10.1191/0959683604hl684ed>

CLARK R.L. 1984. Effects on charcoal of pollen preparation procedures. *Pollen et spores XXVI*, 559-576.

COCHET P. 1959. Etude et culture de la forêt: manuel pratique de gestion forestière. Ecole Nationale des Eaux et Forêts, Nancy.

CONEDERA M., TINNER W., NEFF C., MEURER M., DICKENS A.F., KREBS P. 2009. Reconstructing past fire regimes: methods, applications, and relevance to fire management and conservation. *Quaternary Science Reviews* 28, 555-576. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.11.005>

CONSTANCIO A., BAROCHE C. 2020. La forêt indivise de Haguenau reçoit le label Forêt d'Exception, Dossier de presse, cérémonie de labellisation.

COURT-PICON M. 2007. Mise en place du paysage dans un milieu de moyenne et haute montagne du tardiglaciaire à l'époque actuelle : analyse du signal palynologique en Champsaur (Hautes-Alpes, France) à l'interface des dynamiques naturelles et des dynamiques sociales (These de doctorat). Université de Franche-Comté, Besançon.

CUBIZOLLE H. 2019. Les tourbières et la tourbe: géographie, hydro-écologie, usages et gestion conservatoire, Tec&Doc. Lavoisier, Paris.

CUGNY C. 2011. Apports des microfossiles non-polliniques à l'histoire du pastoralisme sur le versant nord Pyrénéen : entre référentiels actuels et reconstitution du passé (These de doctorat). Toulouse 2, Toulouse.

CUGNY C., MAZIER F., GALOP D. 2010. Modern and fossil non-pollen palynomorphs from the Basque mountains (western Pyrenees, France): the use of coprophilous fungi to reconstruct pastoral

- activity. *Vegetation History and Archaeobotany* 19, 391-408. <https://doi.org/10.1007/s00334-010-0242-6>
- DA LAGE A., MÉTAILLE G. 2015. Dictionnaire de biogéographie végétale. CNRS Editions, Paris.
- DAHL-JENSEN D., MOSEGAARD K., GUNDESTRUP N., CLOW G.D., JOHNSEN S.J., HANSEN A.W., BALLING N. 1998. Past Temperatures Directly from the Greenland Ice Sheet. *Science* 282, 268-271. <https://doi.org/10.1126/science.282.5387.268>
- DALBAVIE T. 2005. Les ruisseaux et zones humides (livret-guide nature, Milieux naturels originaux des Vosges du Nord). Sycoparc.
- DALBAVIE T. 1999. La forêt (livret-guide nature, Milieux naturels originaux des Vosges du Nord). Sycoparc.
- DALBAVIE T. 1997. Les tourbières du Pays de Bitche (livret-guide nature, Milieux naturels originaux des Vosges du Nord). Sycoparc.
- DARINOT F. 2014. Evaluation des propriétés fourragères, agronomiques et calorifiques du foin de marais issu de la Réserve naturelle nationale du Marais de Lavours. *Publications de la Société Linnéenne de Lyon* 3, 54-65. <https://doi.org/10.3406/linly.2014.13866>
- DARMOIS-THÉOBALD M., DENÈFLE M., MENILLET F. 1976. Tourbières de moyenne altitude de la forêt de Haute-Meurthe (Vosges, France). *Quaternaire* 13, 99-107. <https://doi.org/10.3406/quate.1976.1281>
- DAVIS O.K. 1987. Spores of the dung fungus *Sporormiella*: Increased abundance in historic sediments and before Pleistocene megafaunal extinction. *Quaternary Research* 28, 290-294. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(87\)90067-6](https://doi.org/10.1016/0033-5894(87)90067-6)
- DAVIS O.K., SHAFER D.S. 2006. *Sporormiella* fungal spores, a palynological means of detecting herbivore density. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 237, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.11.028>
- DE KLERK P. 2014. Palynological research of the Vosges Mountains (NE France): a historical overview. *Carolinea* 72, 15-39.
- DE VLEESCHOUWER F., FAGEL N., CHEBURKIN A., PAZDUR A., SIKORSKI J., MATTIELLI N., RENSON V., FIALKIEWICZ B., PIOTROWSKA N., LE ROUX G. 2009. Anthropogenic impacts in North Poland over the last 1300 years — A record of Pb, Zn, Cu, Ni and S in an ombrotrophic peat bog. *Science of The Total Environment* 407, 5674-5684. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.07.020>
- DE VLEESCHOUWER F., LE ROUX G., SHOTYK W. 2010. Peat as an archive of atmospheric pollution and environmental change: A case study of lead in Europe. *PAGES* 18, 20-22. <https://doi.org/10.22498/pages.18.1.20>
- DENAIRE A., CROUTSCH C. 2009. L'Age du Bronze ancien (2300-1550 avant J.-C.) en Alsace, in: 10 000 ans d'histoire !: dix ans de fouilles archéologiques en Alsace. Musées de la Ville de Strasbourg, Strasbourg, p. 59-60.

- DENDIEVEL A.-M., HAAS J.N., DELRIEU F., CUBIZOLLE H. 2014. Nouvelles données paléoenvironnementales et archéologiques sur le plateau du Béage. La tourbière de La Narce et ses environs, premiers résultats. *Ardèche archéologie* 31, 27-33.
- DIEDERICH P., SCHWENNINGER J.L. 1990. Les peuplements relictuels de *Pinus sylvestris* L. au Luxembourg. *Bulletin de la Société des naturalistes luxembourgeois* 90, 143-152.
- DION J. 1970. Les forêts de la France du Nord-Est. *Revue Géographique de l'Est* 10, 155-277. <https://doi.org/10.3406/rgest.1970.1170>
- DIOT M.-F. 1992. Etudes palynologiques de blés sauvages et domestiques issus de cultures expérimentales., in: ANDERSON-GERFAUD, P. (Éd.), *Préhistoire de l'agriculture: nouvelles approches expérimentales et ethnographiques*. Ed. CNRS, Paris, p. 107-111.
- DOUDA J., DOUDOVA J., DRASNAROVA A., KUNES P., HADINCOVA V., KRAK K., ZAKRAVSKÝ P., MANDAK B. 2014. Migration Patterns of Subgenus *Alnus* in Europe since the Last Glacial Maximum: A Systematic Review. *PLoS One* 9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088709>
- DOYEN E., ETIENNE D. 2017. Ecological and human land-use indicator value of fungal spore morphotypes and assemblages. *Vegetation History and Archaeobotany* 26, 357-367. <https://doi.org/10.1007/s00334-016-0599-2>
- DRESCH J., ELHAÏ H., DENÈFLE-LABIOLE M. 1966. Analyse pollinique de quatre tourbières du Ballon d'Alsace (Vosges, France). *Compte-rendu sommaire des séances de la Société de Biogéographie* 376, 78-89.
- DREVER C.R., PETERSON G., MESSIER C., BERGERON Y., FLANNIGAN M. 2006. Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? *Canadian Journal of Forest Research* 36, 2285-2299. <https://doi.org/10.1139/x06-132>
- DUBOIS G. 1939. L'analyse pollinique et son application à l'étude du peuplement forestier des montagnes de l'Europe occidentale. *Revue de Géographie Alpine* 27, 591-624. <https://doi.org/10.3406/rga.1939.4016>
- DUBOIS G., DUBOIS C., HEE A., WALTER E. 1938. La végétation et l'histoire de la tourbière d'Erlenmoos en Vosgovie. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de la Moselle* 35, 41-45.
- DUCHAMP L. 2009. Les complexes tourbeux acides du Parc naturel régional des Vosges du Nord. *Annales Scientifiques de la Réserve de Biosphère Transfrontalière Vosges du Nord-Pfälzerwald*, coll. Tourbières 15, 14-27.
- DUCHAMP L. 2004. Plan de gestion de la Réserve Naturelle des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche 2005-2009. SYCOPARC.
- DUCHAMP L., SCHNITZLER A., GRANDMOUGIN L. 2007. Histoire et dynamique actuelle d'un complexe tourbeux sur grès : l'exemple de la tourbière du Grafenweiher dans le pays de Bitche (Vosges du Nord), in: CUBIZOLLE, H. (Éd.), *Origine, fonctionnement et conservation des tourbières*. Actes du colloque, Château de Goutelas, 5-7 octobre 2005. Publications de l'Université de Saint-Étienne, Saint-Etienne, p. 169-180.

- DUPOUEY J.L., DAMBRINE E., LAFFITE J.D., MOARES C. 2002. Irreversible Impact of Past Land Use on Forest Soils and Biodiversity. *Ecology* 83, 2978-2984. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2002\)083\[2978:IIOPLU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2978:IIOPLU]2.0.CO;2)
- EDELMAN H.J. 1985. Late Glacial and Holocene vegetation development of la Goutte Loiselot (Vosges, France) (These de doctorat). Laboratoire de Paléobotanique et Palynologie de l'Université d'Utrecht, Utrecht.
- EMANUELSSON M., SEGERSTRÖM U. 2002. Medieval slash-and-burn cultivation: strategic or adapted land use in the Swedish mining district. *Environment and History* 8, 173-196.
- ENGEL R., KAPP F. 1959. Les Vosges du Nord. *Bulletin de la Société Botanique de France* 106, 105-111.
- ERTLEN D., SCHNEIDER N., GAUTHIER E., WIETHOLD J., RICHARD H., THOMAS Y., BÖES E. 2014. Human environmental impact from the neolithic to the middle ages: a pluridisciplinary approach focused on a small catchment area at the Kochersberg (Bas-rhin, France). *Quaternaire* 25, 195-208. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.7047>
- ETIENNE D. 2011. Les mardelles intra-forestières de Lorraine: origines, archives paléo-environnementales, évolutions dynamiques et gestion conservatoire (These de doctorat). Nancy 1, Nancy.
- ETIENNE D., JOUFFROY-BAPICOT I. 2014. Optimal counting limit for fungal spore abundance estimation using *Sporormiella* as a case study. *Vegetation History and Archaeobotany* 23, 743-749. <https://doi.org/10.1007/s00334-014-0439-1>
- ETIENNE D., RUFFALDI P., DUPOUEY J.L., GEORGES-LEROY M., RITZ F., DAMBRINE E. 2013. Searching for ancient forests: A 2000 year history of land use in northeastern French forests deduced from the pollen compositions of closed depressions. *The Holocene* 23, 678-691. <https://doi.org/10.1177/0959683612470173>
- ETIENNE D., RUFFALDI P., GOEPP S., RITZ F., GEORGES-LEROY M., POLLIER B., DAMBRINE E. 2011. The origin of closed depressions in Northeastern France: A new assessment. *Geomorphology* 126, 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.036>
- FAEGRI K., IVERSEN J. 1989. Textbook of Pollen Analysis, 4th Edition, John Wiley & Sons. ed. Chichester (England).
- FELIU C. 2009. L'Oppidum du fossé des Pandours au col de Saverne, capitale de la cité gauloise des Médiomatriques, in: 10 000 ans d'histoire!: dix ans de fouilles archéologiques en Alsace. Musées de la Ville de Strasbourg, Strasbourg, p. 81-84.
- FERREZ Y., CHOLET J., COLLAUD R., DOR J.-C., DUPONT F., FROELICHER T., GIOVANNACCI L., HENNEQUIN C., LAUMOND M., L'HOSPITALIER M., NGUEFACK J., SIMLER N., VOIRIN M. 2017. Guide phytosociologique des prairies du massif des Vosges et du Jura alsacien, Parc naturel régional des Ballons des Vosges. ed. Munster, France.

- FICHTL S., ADAM A.-M., FELIU C., PIERREVELCIN G., BONAVENTURE B. 2004. L'oppidum médiomatrique du Fossé des Pandours au Col de Saverne (Bas-Rhin), Rapport intermédiaire (Rapport de fouille). Université Marc Bloch – UMR 7044, Étude des Civilisations de l'Antiquité, Strasbourg.
- FIGUS C. 2018. Caractérisation de la fraction minérale des sédiments holocènes de l'étang de Waldeck, rapport de stage, Université de Franche-Comté (Rapport de stage (L3)). Université de Franche-Comté, Besançon.
- FINSINGER W., TINNER W. 2005. Minimum count sums for charcoal concentration estimates in pollen slides: accuracy and potential errors. *The Holocene* 15, 293-297. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl808rr>
- FIRBAS F. 1934. Zur spät- und nacheiszeitlichen Vegetationsgeschichte der Rheinpfalz. *Beih. Botan. Centralbl.* LII, 120-156.
- FIRBAS F., GRÜNIG G., WEISCHEDEL I., WORZEL G. 1948. Beiträge zur spät- und nacheiszeitlichen Vegetationsgeschichte der Vogesen. *Bibliotheca Botanica* 121, 1-76.
- FLINN K.M., VELLEND M. 2005. Recovery of forest plant communities in post-agricultural landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment* 3, 243-250. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0243:ROFPCI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0243:ROFPCI]2.0.CO;2)
- FLOTTE P., FUCHS M. 2004. Carte archéologique de la Gaule: La Moselle. Académie des Inscriptions et Belles-Lettres : Ministère de l'éducation nationale : Ministère de la recherche, Paris, France.
- FLOTTE P., FUCHS M., RICHERT P., LECLANT J. 2000. Carte archéologique de la Gaule: Le Bas-Rhin. Académie des Inscriptions et Belles-Lettres : Ministère de l'éducation nationale : Ministère de la recherche, Paris, France.
- FLUCK P. 2006. Les mines de plomb, cuivre et argent de la Renaissance ont généré des paysages contrastés. L'exemple de l'Alsace et des Vosges (France de l'Est), in: 13e Congrès International du TICCIH (The International Committee for the Conservation of the Industrial Heritage). France.
- FLUCK P., ANCEL B. 1989. Le paysage minier des sites métalliques des Vosges et de la Forêt-Noire. *Annales de Bretagne et des pays de l'Ouest* 96, 183-201. <https://doi.org/10.3406/abpo.1989.3323>
- FOREL B., MONNA F., PETIT C., BRUGUIER O., LOSNO R., FLUCK P., BEGEOT C., RICHARD H., BICHET V., CHATEAU C. 2010. Historical mining and smelting in the Vosges Mountains (France) recorded in two ombrotrophic peat bogs. *Journal of Geochemical Exploration* 107, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.05.004>
- FOSTER D., SWANSON F., ABER J., BURKE I., BROKAW N., TILMAN D., KNAPP A. 2003. The importance of land-use legacies to ecology and conservation. *Bioscience* 53, 77-88. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0077:TIOLUL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0077:TIOLUL]2.0.CO;2)
- FREYSSINET E. 2007. L'organisation du territoire entre Meuse et Rhin à l'époque romaine (These de doctorat). Strasbourg 2, Strasbourg.

- GALOP D., VANNIERE B., LOPEZ-SAEZ J.A. 2000. Des abattis-brûlis néolithiques au système agro-pastoral pyrénéen actuel. Mise en évidence pluridisciplinaire de l'évolution du système agraire dans une vallée du piémont nord-pyrénéen entre le Néolithique ancien et l'Antiquité tardive, in: XII Colloqui internacional d'arqueologia de Puigcerda. Puigcerda, Spain, p. 261-274.
- GARDNER J.J., WHITLOCK C. 2016. Charcoal accumulation following a recent fire in the Cascade Range, northwestern USA, and its relevance for fire-history studies: *The Holocene* 11, 541-549. <https://doi.org/10.1191/095968301680223495>
- GARNIER E. 2018. Une terre de conquêtes. *Télérama* Hors-série, 18-23.
- GARNIER E. 2004. Terre de conquêtes. La forêt vosgienne sous l'Ancien Régime, Fayard. ed. Paris.
- GARNIER E. 2000. Les forêts des Vosges méridionales à l'époque moderne : Des espaces forestiers éclatés et convoités (These de doctorat). Université de Franche-Comté, Besançon.
- GEIRSDÓTTIR Á., MILLER G.H., ANDREWS J.T., HARNING D.J., ANDERSON L.S., FLORIAN C., LARSEN D.J., THORDARSON T. 2019. The onset of neoglaciation in Iceland and the 4.2 ka event. *Climate of the Past* 15, 25-40. <https://doi.org/10.5194/cp-15-25-2019>
- GOCEL-CHALTÉ D., GUEROLD F., KNAPP H., ROBIN V. 2020. Anthracological analyses of charcoal production sites at a high spatial resolution: the role of topography in the historical distribution of tree taxa in the northern Vosges mountains, France. *Vegetation History and Archaeobotany*. <https://doi.org/10.1007/s00334-020-00769-z>
- GOEPP S. 2007. Origine, histoire et dynamique des Hautes-Chaumes du massif vosgien : Déterminismes environnementaux et actions de l'Homme (These de doctorat). Strasbourg 1.
- GOEPP S., SCHWARTZ D., THINON M., JEUNESSE C. 2007. Pédoanthracologie, dynamiques de végétation et anthropisation dans les Hautes-Vosges (Massif du Rossberg, Haut-Rhin, France)., in: DUPOUEY, J.L., DAMBRINE, E., DARDIGNAC, C., GEORGES-LEROY, M. (Éd.), La mémoire des forêts, Actes de colloque. Présenté à Forêt, archéologie et environnement, 14-16 décembre 2004, coédité par Office national des forêts, l'Institut national de la recherche agronomique et la Direction régionale des affaires culturelles de Lorraine, Paris, Metz, p. 35-43.
- GOUBET P. 2014. Analyse des macrorestes des tourbières du Parc naturel régional des Vosges du Nord et radiodatations carbone associées (Compte rendu d'étude commandée par le Parc naturel régional des Vosges du Nord). Cabinet Pierre GOUBET, Ardes/Couze.
- GOURIVEAU E., RUFFALDI P., DUCHAMP L., ROBIN V., SCHNITZLER A., WALTER-SIMONNET A.-V. 2020. Holocene vegetation history in the Northern Vosges Mountains (NE France): Palynological, geochemical and sedimentological data. *The Holocene*. <https://doi.org/10.1177/0959683620902229>
- GRESSER P., RICHARD H. 1986. Palynologie et sources écrites : le cas du Jura à l'époque médiévale. *Hommes et Terres du Nord* 2, 102-105. <https://doi.org/10.3406/htn.1986.2046>
- GRIMM E. 1991. Tilia and Tilia Graph, Illinois State Museum. ed. Illinois.

- GRIMM E. 1987. CONISS: a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences* 13, 13–35.
- GRÖNLUND E., ASIKAINEN E. 1992. Reflections of slash-and-burn cultivation cycles in a varved sediment of Lake Pitkälampi (North Karelia). *Laborativ Arkeologi* 6, 43-48.
- GRONENBORN D. 2003. Migration, acculturation and culture change in western temperate Eurasia, 6500-5000 cal BC. *Documenta Praehistorica* 79-91.
- GRONENBORN D. 2007. Beyond the models : 'Neolithisation' in Central Europe, in: *Proceedings-British Academy*. Oxford University Press Inc., Oxford, p. 73.
- GUILLET B., HASSKO B., JAEGY R. 1972. Approche palynologique de la limite spontanée du sapin sur la bordure orientale du Plateau Lorrain. *Compte rendu Académie des Sciences de Paris* 274, 2966-2968.
- GUILLET B., JANSSEN C.R., KALIS A.J., DE VALK E.J. 1976. La végétation pendant le Post-Glaciaire dans l'Est de la France, in: GUILAINE, J. (Éd.), *La Préhistoire Française ; Tome II: Les Civilisations Néolithiques et Protohistoriques de la France*. Editions du CNRS, Paris, p. 82-87.
- GUINIER Ph. 1959. Trois Conifères de la flore vosgienne. *Bulletin de la Société Botanique de France* 106, 168-183. <https://doi.org/10.1080/00378941.1959.10835321>
- HAMMER O., HARPER D.A.T., RYAN P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica* 4, art. 4.
- HATT J.-P. 1937. Contribution à l'analyse pollinique des tourbières du nord-est de la France. *Bulletin du service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine* 4, 1-79.
- HEIRI O., LOTTER A.F., LEMCKE G. 2001. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology* 25, 101-110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- HERMY M., VERHEYEN K. 2007. Legacies of the past in the present-day forest biodiversity: a review of past land-use effects on forest plant species composition and diversity. *Ecological Research* 22, 361-371. <https://doi.org/10.1007/s11284-007-0354-3>
- HERRMANN A. 1914. *Die Allmenden im Bezirk Unter-Elsaß: eine sozialwirtschaftliche Studie*. Strassburger Druck und Verlags-Anstalt, Straßburg.
- HIEGEL B. 2006. L'agriculture dans le Pays de Bitche au milieu du XVIIIe siècle, in: ROBIN, B. (Éd.), *Le Pays de Bitche, il y a 250 ans*. SHAL, Section du pays de Bitche, Bitche, France, p. 71-79.
- HIGUERA P. 2009. *CharAnalysis 0.9: Diagnostic and Analytical Tools for Sediment-charcoal*, Montana State University, University of Illinois. ed.
- HIRSCHINGER H. 1991. Coup d'oeil sur les châteaux des Vosges du Nord. *Les Vosges* 2/91, 17-19.

- HUNTLEY B., BARTLEIN P.J., PRENTICE I.C. 1989. Climatic Control of the Distribution and Abundance of Beech (*Fagus L.*) in Europe and North America. *Journal of Biogeography* 16, 551-560. <https://doi.org/10.2307/2845210>
- HUSSON J.-P. 1995. L'essor protoindustriel et ses héritages dans le Pays de Bitche. *Les Cahiers Lorrains* 4, 245-254.
- INRAP 2016. Archéologie du vin [WWW Document]. *Dossier multimédia : Archéologie du vin*. URL www.inrap.fr/dossiers/Archeologie-du-Vin/home
- IPCC 2019. Summary for Policymakers, in: SHUKLA, P.R., SKEA, J., CALVO BUENDIA, E., MASSON-DELMOTTE, V., PÖRTNER, H.-O., ROBERTS, D.C., ZHAI, P., SLADE, R., CONNORS, S., VAN DIEMEN, R., FERRAT, M., HAUGHEY, E., LUZ, S., NEOGI, S., PATHAK, M., PETZOLD, J., PORTUGAL PEREIRA, J., VYAS, P., HUNTLEY, E., KISSICK, K., BELKACEMI, M., MALLEY, J. (Éd.), *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In press, Genève.
- JACKSON S.T. 1990. Pollen source area and representation in small lakes of the northeastern United States. *Review of Palaeobotany and Palynology* 63, 53-76. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(90\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0034-6667(90)90006-5)
- JACKSON S.T., HOBBS R.J. 2009. Ecological Restoration in the Light of Ecological History. *Science* 325, 567-569. <https://doi.org/10.1126/science.1172977>
- JACOPS M.-F., GUILLAUME J., HEMMERT D. 1990. Le pays de Bitche, Moselle. Ed. Serpenoise, Metz, France.
- JANSSEN C.R., BRABER F.I. 1987. The present and past grassland vegetation of the Chajoux and Moselotte valleys (Vosges, France). 2. Dynamic aspects and origin of grassland vegetation in the Chajoux valley, interpreted from the contrast between regional and local pollen deposition of dominant pollen types and the distribution of pollen indicators in pollen diagrams. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. Series C* 90, 115-138.
- JANSSEN C.R., CUP-UITERWIJK M.J.J., EDELMAN H.J., MEKEL-TE RIELE J., PALS J.P. 1975. Ecologic and paleoecologic studies in the Feigne d'Artimont (Vosges, France). *Plant Ecol* 30, 165-178. <https://doi.org/10.1007/BF02389705>
- JANSSEN C.R., JANSSEN-KETTLITZ E.L. 1972. A post-atlantic pollen sequence from the tourbière du Tanet (Vosges, France). *Pollen et Spores* XIV, 65-77.
- JEHIN P. 2010. Forêts et communautés religieuses en Alsace sous l'Ancien Régime. *Mabilon* 21, 187-208.
- JEHIN P. 2008. La stratégie industrielle de l'entreprise De Dietrich au XVIIIe siècle dans les Vosges du Nord, carte. Université de Haute Alsace, Strasbourg.

- JEHIN P. 2006a. Le rôle économique des forêts du Pays de Bitche au XVIII^e siècle, in: ROBIN, B. (Éd.), Le Pays de Bitche, il y a 250 ans. SHAL, Section du pays de Bitche, Bitche, France, p. 57-69.
- JEHIN P. 2006b. Rivières, étangs et pisciculture dans les Vosges du Nord avant la Révolution. *Annales Scientifiques de la Réserve de Biosphère Transfrontalière Vosges du Nord-Pfälzerwald* 13, 91-112.
- JEHIN P. 2005. Les forêts des Vosges du Nord du Moyen-Age à la Révolution: Milieux, usages, exploitations, Presses universitaires de Strasbourg. ed. Presses universitaires de Strasbourg, Strasbourg.
- JEUNESSE C. 2009. Graines et pollens: une controverse autour du « Néolithique initial », in: 10 000 ans d'histoire!: dix ans de fouilles archéologiques en Alsace. Musées de la Ville de Strasbourg, Strasbourg, p. 15-16.
- JEUNESSE C. 2003. L'histoire sur le terrain: néolithique « "initial" », néolithique ancien et néolithisation dans l'espace centre-européen: une vision rénovée. *Revue d'Alsace* 129, 97-112.
- JOLY C., VISET L., SCAON C., PONT-TRICOIRE C., FROQUET-UZEL H. 2008. Archéologie préventive et évolution du paysage végétal de l'Âge du Fer au Moyen Âge dans le Gâtinais : mise en évidence de culture de chanvre et d'activités de rouissage (Courcelles et Sceaux-en-Gâtinais, Loiret, France). *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie* 15-30. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.921>
- JOOSTEN H., CLARKE D. 2002. Wise use of mires and peatlands: background and principles including a framework for decision-making. International Peat Society ; International Mire Conservation Group, Saarijärvi, Finland.
- JOUFFROY-BAPICOT I. 2010. Evolution de la végétation du massif du Morvan (Bourgogne - France) depuis la dernière glaciation à partir de l'analyse pollinique : Variations climatiques et impact des activités anthropiques (These de doctorat). Université de Franche-Comté, Besançon.
- JOUFFROY-BAPICOT I. 2007. Impact environnemental des activités paléométallurgiques sur la forêt du Morvan (région du Mont-Beuvray). Résultats croisés des analyses pollinique et géochimique, in: DUPOUEY, J.L., DAMBRINE, E., DARDIGNAC, C., GEORGES-LEROY, M. (Éd.), La mémoire des forêts, Actes de colloque. Présenté à Forêt, archéologie et environnement, 14-16 décembre 2004, coédité par Office national des forêts, Institut national de la recherche agronomique, Direction régionale des affaires culturelles de Lorraine, Paris, Metz, p. 45-55.
- JOUFFROY-BAPICOT I., PULIDO M., BARON S., GALOP D., MONNA F., LAVOIE M., PLOQUIN A., PETIT C., DE BEAULIEU J.-L., RICHARD H. 2007. Environmental impact of early palaeometallurgy: pollen and geochemical analysis. *Vegetation History and Archaeobotany* 16, 251-258.
- JURASZEK H. 1928. Pflanzensoziologische Studien über die Dünen bei Warschau. *Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, Série B.* 1927, 565-610.
- KALIS A.J. 1985. Un miroir éloigné: les défrichements anthropogènes dans les zones de basse altitude, réfléchis dans des diagrammes polliniques montagnards, in: RENAULT-MISKOVSKI, J., BUI-THI-MAI, GIRARD, M. (Éd.), Palynologie archéologique. Présenté à Actes des Journées du 25-

26-27 janvier 1984, C.N.R.S., Centre de Recherches Archéologiques, Notes et Monographies Techniques n°17, Paris, France, p. 195-211.

KALIS A.J. 1984. L'indigenat de l'Épicea dans les Hautes Vosges. *Revue de Paléobiologie* vol.sp., 103-115.

KALIS A.J., MERKT J., WUNDERLICH J. 2003. Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe - human impact and natural causes. *Quaternary Science Reviews* 22, 33-79. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00181-6)

KALIS A.J., VAN DER KNAAP W.O., SCHWEIZER A., URZ R. 2006. A three thousand year succession of plant communities on a valley bottom the Vosges Mountains, NE France, reconstructed from fossil pollen, plant macrofossils, and modern phytosociological communities. *Vegetation History and Archaeobotany*, 15, 377-390.

KAMMERER O. 2012. Le vignoble alsacien du VIIe au XIXe siècle. Atlas historique d'Alsace.

KAPP Ed., SCHAEFER R. 1965. La culture du chanvre dans la plaine rhénane : Importance économique et rôle de cette fibre textile dans la vie rurale de l'Alsace de jadis. *Arts et traditions populaires* 13, 35-52.

KNAPP H., ROBIN V., KIRLEIS W., NELLE O. 2013. Woodland history in the upper Harz Mountains revealed by kiln site, soil sediment and peat charcoal analyses. *Quaternary International* 289, 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.03.040>

KOERNER W., DUPOUEY J.-L., DAMBRINE E., BENOÎT M. 1997. Influence of past land use on the vegetation and soils of present day forest in the Vosges mountains, France. *Journal of Ecology* 85, 351-358.

KRAFT J.-F. 2015. La forge de Graffenweyer 1761-1767. *Annuaire de la Société d'Histoire et d'Archéologie de Reichshoffen et Environs* 35, 62-72.

KRAFT J.-F. 2012. Le redémarrage des forges de Mouterhouse au 18ème siècle: la volonté de Jean-Frédéric Dithmar. *La Revue du pays de Bitche* 13, 14-29.

KRAFT J.-F. 2011. Les Vosges du Nord: terre de légende? *La Revue du pays de Bitche* 12, 12-18.

KREISER A., ANDERSON N., APPLEBY P., BATTARBEE R., MASSABUAU J., PATRICK S., PROBST A., RIPPEY B., ROSE N. 1992. A paleolimnological study of the water quality of lakes in the Vosges mountains of France. Report to the University of Bordeaux by ENSIS Ltd, London.

KÜSTER H. 1997. The role of farming in the postglacial expansion of beech and hornbeam in the oak woodlands of central Europe. *The Holocene* 7, 239-242. <https://doi.org/10.1177/095968369700700213>

LABRUE C. 2009. Le massif, ses marges et la préoccupation d'enfermement de l'habitat. Exemple des Vosges du Nord. *Revue Géographique de l'Est* 49.

- LACOMBE T. 2012. Contribution à l'étude de l'histoire évolutive de la vigne cultivée (*Vitis vinifera* L.) par l'analyse de la diversité génétique neutre et de gènes d'intérêt (These de doctorat). Montpellier, SupAgro, Montpellier.
- LANDMANN G., DUPOUEY J.-L., BADEAU V., LEFEVRE Y., BRED A N., NAGELEISEN L.-M., CHUINE I., LEBOURGEOIS F.F. 2007. Le Hêtre face aux changements climatiques. *RDV techniques, ONF hors-série n°2*, 29-38.
- LATAŁOWA M., VAN DER KNAAP W.O. 2006. Late Quaternary expansion of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst. in Europe according to pollen data. *Quaternary Science Reviews* 25, 2780-2805. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2006.06.007>
- LAUBER K., WAGNER G., GYGAX A., GFELLER E. 2018. Flora Helvetica: flore illustrée de Suisse : avec 3200 descriptions de plantes à fleurs, de fougères et de plantes cultivées, avec cartes de distribution. Belin, Paris, France.
- LE ROUX G. 2005. Fate of natural and anthropogenic particles in peat bogs (Thesis). Fakultät für Chemie und Geowissenschaften, Institut für Geowissenschaften, Heidelberg.
- LE ROY LADURIE E. 2009. Considérations sur le climat. *Responsabilité & Environnement* 56, 9-13.
- LEESCH D., FABRE M., SCHOCH W.-H. 2017. Les occupations mésolithiques des abris-sous-roche de Berdorf-Kelekapp 2 (Grand-Duché de Luxembourg). *Dossier d'archéologie, CNRA XIX*, 45-54.
- LEMEÉ G. 1963. L'évolution de la végétation et du climat des Hautes Vosges Centrales depuis la Dernière Glaciation, in: Le Hohneck: aspects physiques, biologiques, et humains. Association philomathique d'Alsace et de Lorraine, Strasbourg, p. 185-192.
- LEMEÉ G. 1955. L'évolution de la Forêt française au cours du Quaternaire d'après les analyses polliniques. *Revue Forestière Française* 6, 442-460. <https://doi.org/10.4267/2042/27100>
- LEROYER C. 2010. Apparition et diffusion du châtaignier (*Castanea sativa*) en Dordogne: l'apport de la palynologie, in: Des Hommes et des Plantes. Exploitation du milieu et gestion des ressources végétales de la Préhistoire à nos jours. Présenté à XXXe rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, Editions apdga, Antibes, p. 211-224.
- LEYPOLD D. 1996. La métallurgie du fer dans le massif vosgien: la vallée de la Bruche de l'Antiquité au XIXe siècle, Recherches et documents. Société savante d'Alsace, Strasbourg, France.
- LIEUTAGHI P. 2004. Le livre des arbres, arbustes & arbrisseaux. Acte Sud, Arles, France.
- LOHMEYER W. 1978. Über schutzwürdige natürliche Schlehen-Ligustergebüsche mit Lorbeerseidelbast und einige ihrer Kontaktgesellschaften im Mittelrheingebiet. *Natur und Landschaft* 53, 271-277.
- LUDEMANN T. 2010. Past fuel wood exploitation and natural forest vegetation in the Black Forest, the Vosges and neighbouring regions in western Central Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 291, 154-165. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2009.09.013>

- LUTZ M. 1960. Autour des établissements humains des sommets vosgiens. *Les Cahiers Lorrains* 1, 8-11.
- MÄCKEL R., FRIEDMANN A., SUDHAUS D. 2009. Environmental changes and human impact on landscape development in the Upper Rhine region. *Erdkunde* 63, 35-49. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2009.01.03>
- MAGNY M. 2019. Aux racines de l'anthropocène. Une crise écologique reflet d'une crise de l'homme. Bord De l'Eau Editions, Lormont.
- MALRAIN F., MATTERNE V., MENIEL P. 2006. Le second Âge du Fer (La Tène), in: FERDIERE, A., MALRAIN, F., MATTERNE, V., MENIEL, P., NISSEN JAUBERT, A. (Éd.), Histoire de l'agriculture en Gaule 500 av. J.-C. - 1000 ap. J.-C., Collection des Hespérides. Errance, Paris, p. 11-64.
- MANEN C., MAZURIE DE KEROUAIN K. 2003. Les concepts " La Hoguette " et " Limbourg " : un bilan des données., in: M, B., L-I, S.G., PH, C. (Éd.), ConstellaSion. Hommage à Alain Gallay, Cahiers d'archéologie romande ; 95. Lausanne : cahiers d'archéologie romande, Lausanne, p. 115-145.
- MANGIN M. (Éd.) 2004. Le fer. Éd. Errance, Paris, France.
- MANN M.E. 2002. Little Ice Age, in: MACCRACKEN, M.C., PERRY, J.S., MUNN, T. (Éd.), Encyclopedia of global environmental change, volume 1: The Earth system: physical and chemical dimensions of global environmental change. John Wiley & Sons, Chichester (England), p. 504-509.
- MANNEVILLE O.A., VERGNE V., VILLEPOUX O., MATTHEY W. 2006. Le monde des tourbières et des marais: France, Suisse, Belgique, Luxembourg. Delachaux et Niestlé, Paris, France.
- MARIET A.-L. 2016. Contamination en éléments traces métalliques et changements de végétation liés aux activités minières dans le massif des Vosges : approche diachronique et synchronique des impacts environnementaux (These de doctorat). Université de Franche-Comté, Besançon.
- MARIET A.-L., BEGEOT C., GIMBERT F., GAUTHIER J., FLUCK P., WALTER-SIMMONET A.-V. 2016. Past mining activities in the Vosges Mountains (eastern France): Impact on vegetation and metal contamination over the past millennium. *The Holocene* 26 (8), 1225-1236.
- MARTIN P. 2015. Verre et cristal en Lorraine et Alsace, Les patrimoines. L'Est Républicain.
- MATHER A.S., NEEDLE C.L., FAIRBAIRN J. 1998. The human drivers of global land cover change: the case of forests. *Hydrological Processes* 12, 1983-1994. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19981030\)12:13/14<1983::AID-HYP713>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19981030)12:13/14<1983::AID-HYP713>3.0.CO;2-M)
- MATHEVET R., BOUSQUET F. 2014. Résilience & environnement: penser les changements socio-écologiques, Buchet Chastel. ed. Paris.
- MATHIS D., MATHIS A. 2016. Anciens et nouveaux terroirs d'étangs en Lorraine. *Revue Géographique de l'Est* 56.
- MAZOYER M., ROUDART L. 2002. Histoire des agricultures du monde: du néolithique à la crise contemporaine. Éditions du Seuil, Paris, France.

- MELOUX J., BECQ-GIRAUDON J.-F., CAOUS J.-Y., COULOMBEAU C., DONSIMONI M., FEYS R., LOUGNON J., MONCIARDINI C., WIMMENAUER W., DEJONGHE L. 1987. Carte des gîtes minéraux de la France à 1/500 000, feuille Lille-Bruxelles.
- MENGUS N. 2011. Au temps des Médiomatiques, au pays de Bitche et ses environs. *La Revue du pays de Bitche* 12, 23-42.
- MENGUS N. 2009. Donjons et courtines: châteaux forts et fortifications médiévales de Lorraine. Editions Pierron, Paris, France.
- MENILLET F. 2015. Carte géologique détaillée de la France (1/50000), feuille Haguenau (2^e édition) (198).
- MENILLET F., DURAND M., GENTER A., PARTY J.-P. 2015. Carte géologique détaillée de la France (1/50 000), feuille Haguenau (2^e édition) (198), Notice explicative. BRGM, Orléans.
- MERCURI A.M., ACCORSI C.A., BANDINI MAZZANTI M. 2002. The long history of Cannabis and its cultivation by the Romans in central Italy, shown by pollen records from Lago Albano and Lago di Nemi. *Vegetation History and Archaeobotany* 11, 263-276. <https://doi.org/10.1007/s003340200039>
- MESSERLI B., GROSJEAN M., HOFER T., NÚÑEZ L., PFISTER C. 2000. From nature-dominated to human-dominated environmental changes. *Quaternary Science Reviews* 19, 459-479. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(99\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(99)00075-X)
- MEUSEL H. 1937. Mitteldeutsche Vegetationsbilder 1, Die Steinklöße bei Nebra und des Zigelrodaer Forst. *Hercynia* 1, 8-98.
- MEYER N., NÜSSLEIN A. 2014. Une partie de la campagne gallo-romaine du Haut-Empire des cités des Médiomatiques et des Triboques préservée par la forêt : les habitats et parcellaires des Vosges du Nord (Moselle et Bas-Rhin) de part et d'autre du seuil de Saverne. Présenté à Les parcellaires conservés sous forêt, Paris, France.
- MIGHALL T., TIMBERLAKE S., MARTÍNEZ-CORTIZAS A., SILVA-SÁNCHEZ N., FOSTER I.D.L. 2017. Did prehistoric and Roman mining and metallurgy have a significant impact on vegetation? *Journal of Archaeological Science: Reports* 11, 613-625. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.12.021>
- MIGHALL T.M., ABRAHAMS P.W., GRATTAN J.P., HAYES D., TIMBERLAKE S., FORSYTH S. 2002. Geochemical evidence for atmospheric pollution derived from prehistoric copper mining at Copa Hill, Cwmystwyth, mid-Wales, UK. *Science of The Total Environment* 292, 69-80. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00027-X)
- MIRAS Y. 2009. L'étude des relations entre végétation et pluie pollinique actuelle sur le plateau de Millevaches (Limousin, France): outil pour une meilleure caractérisation pollenanalytique des formes paysagères et des pratiques agrosylvopastorales. *Revue des Sciences Naturelles d'Auvergne* 73, 71-105.
- MIRAS Y. 2004. L'Analyse pollinique du plateau de millevaches (massif central, France) et de sites périphériques limousins et auvergnats : approche des paléoenvironnements, des systèmes

agro-pastoraux et évolution des territoires ruraux (These de doctorat). Université de Franche-Comté, Besançon.

- MIRAS Y., BEAUGER A., LAVRIEUX M., BERTHON V., SERIEYSSOL K., ANDRIEU-PONEL V., LEDGER P.M. 2015. Tracking long-term human impacts on landscape, vegetal biodiversity and water quality in the Lake Aydat catchment (Auvergne, France) using pollen, non-pollen palynomorphs and diatom assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 424, 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.02.016>
- MIRAS Y., GUENET P., RICHARD H. 2011. Holocene vegetation, landscape, and reconstruction of human activity from prehistory to the roman period based on new pollen data performed in "the plateau de Millevaches" (Limousin, Massif Central, France). *Quaternaire* 2, 147-164. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.5927>
- MONNA F., PETIT C., GUILLAUMET J.P., JOUFFROY-BAPICOT I., BLANCHOT C., DOMINIK J., LOSNO R., RICHARD H., LEVEQUE J., CHATEAU C. 2004. History and environmental impact of mining activity in Celtic Aeduan territory recorded in a peat bog (Morvan, France). *Environmental Science & Technology* 38, 665-673. <https://doi.org/10.1021/es034704v>
- MOONEY S.D., BLACK M. 2003. A simple and fast method for calculating the area of macroscopic charcoal isolated from sediments. *Quaternary Australasia* 21, 18-21.
- MOONEY S.D., TINNER W. 2011. The analysis of charcoal in peat and organic sediments. *Mires and Peat* 7, 1-18.
- MULLER S. 2005. Les phytocénoses d'indigénat du Pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.) sur les affleurements de grès du Pays de Bitche (Vosges du Nord). *Ferrantia* 44, 119-122.
- MULLER S. 1986. La végétation du Pays de Bitche (Vosges du Nord) : analyse phytosociologique : application à l'étude synchronique des successions végétales, Thèse d'état (Thèse d'état). Université Paris-Sud, Orsay.
- MULLER S., GENOT J.-Cl. 1991. La conservation des patrimoines naturels forestiers dans le Parc naturel régional de Vosges du Nord. *Revue Forestière Française* XLIII, 51-56.
- MULLER Y. (Éd.) 2012. La Biodiversité (faune, flore, fonge) de la Réserve de la Biosphère des Vosges du Nord. État des connaissances et évolution au cours des dernières décennies. *Ciconia (numéro spécial)* 36, 476p.
- NELLE O., ROBIN V., TALON B. 2013. Pedoanthracology: Analysing soil charcoal to study Holocene palaeoenvironments. *Quaternary International, Pedoanthracology and Environmental Studies* 289, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.024>
- OECKINGHAUS R. 1917. Von Bitscher Land und seiner Geschichte (traduit en français par Emile Eitel, Lemberg, 2008). Strasbourg.
- PARMENTIER D. 2007. Vosges: Massif d'histoire, terre de liberté., La Nuée Bleue. ed. Strasbourg.

- PASSARGE H., HOFMANN G. 1968. Pflanzengesellschaften des nordostdeutschen Flachlandes II. *Pflanzensoziologie* 16, 1-305.
- PATTERSON W.A., EDWARDS K.J., MAGUIRE D.J. 1987. Microscopic charcoal as a fossil indicator of fire. *Quaternary Science Reviews* 6, 3-23. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(87\)90012-6](https://doi.org/10.1016/0277-3791(87)90012-6)
- PAYETTE S., ROCHEFORT L. (Éd.) 2001. Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Les Presses de l'Université Laval, Ste-Foy, Québec, Canada.
- PETERSON G., ALLEN C.R., HOLLING C.S. 1998. Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale. *Ecosystems* 1, 6-18. <https://doi.org/10.1007/s100219900002>
- PETRY F. 1981. La culture gallo-romaine des sommets vosgiens : bilan d'une décennie de fouilles. *Revue Archéologique* 1, 161-167.
- PLANTUREUX S., BAYEUR C. 2013. Les prairies permanentes dans les Vosges du Nord. Une ressource agricole de qualité à valeur écologique avérée. *Dossier du SYCOPARC* 12.
- PNR VOSGES DU NORD 2014. Charte du Parc naturel régional des Vosges du Nord : projet de territoire, Horizon 2025. Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, La Petite-Pierre.
- PNR VOSGES DU NORD 2011. Diagnostic territorial - Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, Projet de territoire horizon 2025, document de travail. Parc Naturel Régional des Vosges du Nord, La Petite-Pierre.
- PRADAT B. 2015. Le comptage des céréales et des légumineuses en carpologie : recensement des méthodes utilisées en France et essais comparatifs sur des assemblages archéobotaniques. *ArcheoSciences. Revue d'archéométrie* 39, 51-68. <https://doi.org/10.4000/archeosciences.4382>
- RAMEAU J.C., MANSION D., DUME G. 1989. Flore Forestière Française, guide écologique illustré. Tome 1 : Plaines et collines. Institut pour le développement forestier : Ministère de l'agriculture et de la forêt, Direction de l'espace rural et de la forêt : Ecole nationale du génie rural, des eaux et des forêts, Paris, France.
- REILLE M. 2015. Dictionnaire visuel des arbres et arbustes communs. Ulmer, Paris.
- REILLE M. 1992. Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord, Laboratoire de botanique historique et palynologique. ed. Aix-Marseille III.
- REIMER P.J., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BLACKWELL P.G., RAMSEY C.B., BUCK C.E., CHENG H., EDWARDS R.L., FRIEDRICH M., GROOTES P.M., GUILDERSON T.P., HAFIDASON H., HAJDAS I., HATTE C., HEATON T.J., HOFFMANN D.L., HOGG A.G., HUGHEN K.A., KAISER K.F., KROMER B., MANNING S.W., NIU M., REIMER R.W., RICHARDS D.A., SCOTT E.M., SOUTHON J.R., STAFF R.A., TURNEY C.S.M., VAN DER PLICHT J. 2013. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon* 55, 1869-1887. https://doi.org/10.2458/azu_js_rc.55.16947
- REVELLES J., VAN GEEL B. 2016. Human impact and ecological changes in lakeshore environments. The contribution of non-pollen palynomorphs in Lake Banyoles (NE Iberia). *Review of Palaeobotany and Palynology* 232, 81-97. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2016.05.004>

- RICHARD H., ARBOGAST R.-M., ROTH-ZEHNER M., JEUNESSE C., MASSA C., GAUTHIER E. 2016. Analyse pollinique du site de Hagenthal-le-Bas (Haut-Rhin, France) et occupations archéologiques de l'est du Sundgau. *Quaternaire* 27, 315-327. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.7754>
- RNN DES ROCHERS ET TOURBIERES DU PAYS DE BITCHE 2018. Rapport d'activité 2017. RNN des Rochers et Tourbières du Pays de Bitche.
- ROBIN V., RICKERT B.-H., NADEAU M.-J., NELLE O. 2012. Assessing Holocene vegetation and fire history by a multiproxy approach: The case of Stodthagen Forest (northern Germany). *The Holocene* 22, 337-346. <https://doi.org/10.1177/0959683611423687>
- ROCHEL X. 2017. Une biogéographie historique. Forêts et industries dans le comté de Bitche au xviiiè siècle. *Histoire & mesure* XXXII, 9-38. <https://doi.org/10.4000/histoiresmesure.6076>
- ROCHEL X. 2015. La fin des vides en forêt : Essais de cartographie historique. *Revue Forestière Française* 6, 539-556. <https://doi.org/10.4267/2042/60722>
- ROCHEL X. 2010. Doit-on réhabiliter les milieux ouverts dans les massifs forestiers vosgiens ? Un enjeu écologique et paysager revu par la biogéographie historique. *Revue Géographique de l'Est* 49.
- ROCHEL X. 2009. L'irrigation des prés, une pratique agraire traditionnelle dans la montagne vosgienne., in: Eau, flottage et industries à Raon-l'Étape. Présenté à Journées d'études vosgiennes 2009, Fédération des Sociétés Savantes des Vosges, Epinal.
- ROCHEL X. 2004. Gestion forestière et paysages dans les Vosges d'après les registres de martelages du XVIIIè siècle : essai de biogéographie historique (These de doctorat). Nancy 2, Nancy.
- ROGER J. 2007. Carte geologique harmonisé du département de moselle (No. RP-55492-FR), Rapport géologique. BRGM.
- RÖSCH M. 2009. Zur vorgeschichtlichen Besiedlung und Landnutzung im nördlichen Schwarzwald aufgrund vegetationsgeschichtlicher Untersuchungen in zwei Karseen. *Mitt. Ver. Forstl. Standortkunde u. Forstpflanzenzüchtung* 46, 69-82.
- RÖSCH M. 2007. Botanical evidence for prehistoric and medieval land use in the Black Forest, in: Medieval Rural Settlement in Marginal Landscapes, Ruralia. Brepols Publishers, p. 335-343. <https://doi.org/10.1484/M.RURALIA-EB.3.1181>
- RÖSCH M. 2000. Long-term human impact as registered in an upland pollen profile from the southern Black Forest, south-western Germany. *Vegetation History and Archaeobotany* 9, 205-218. <https://doi.org/10.1007/BF01294635>
- RÖSCH M. 1992. Human impact as registered in the pollen record: some results from the western Lake Constance region, Southern Germany. *Vegetation History and Archaeobotany* 1, 101-109. <https://doi.org/10.1007/BF00206090>
- RÖSCH M., KLEINMANN A., LECHTERBECK J., WICK L. 2014. Botanical off-site and on-site data as indicators of different land use systems: a discussion with examples from Southwest Germany. *Vegetation History and Archaeobotany* 23, 121-133. <https://doi.org/10.1007/s00334-014-0437-3>

- RUDRAUF J.-M. 2009a. Les châteaux forts des Vosges du Nord: deuxième partie: leurs particularités monumentales. *Les Vosges* 3/09, 10-13.
- RUDRAUF J.-M. 2009b. Les châteaux forts des Vosges du Nord: première partie: un aperçu de leur histoire. *Les Vosges* 1/09, 5-9.
- RUDRAUF J.-M. 2008. Les châteaux de la région de Bitche : quelques réflexions sur leur origine et sur leur fin. *La Revue du pays de Bitche* 9, 24-39.
- RUFFALDI P. 1999. Premières traces polliniques de néolithisation des zones de basse altitude de Lorraine (France). *Quaternaire* 10, 263-270.
- RUFFALDI P., ETIENNE D., LAPLAIGE C., BEGEOT C., DAMBRINE E., ANNE-VERONIQUE WALTER-SIMONNET 2015. Dynamique holocène de la végétation et impact anthropique dans les zones de basses altitudes de Lorraine (France), XXIVe colloque APLF. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4301.4168>
- RUFFALDI P., RITZ F., RICHARD H., DAMBRINE E., DUPOUEY J.-L. 2007. Analyse pollinique de la mardelle d'Assenoncourt (Moselle, France): impact des pratiques agricoles sur la biodiversité végétale en milieu forestier, in: DUPOUEY, J.L., DAMBRINE, E., DARDIGNAC, C., GEORGES-LEROY, M. (Éd.), La mémoire des forêts, Actes de colloque. Présenté à Forêt, archéologie et environnement, 14-16 décembre 2004, Office national des forêts, Institut national de la recherche agronomique et Direction régionale des affaires culturelles de Lorraine, Paris, Metz, p. 69-77.
- SCHILPEROORD P. 2017. Plantes cultivées en Suisse - Le seigle. Verein für alpine Kulturpflanzen, Alvaneu, Suisse.
- SCHMIT S. 2015. Sur les traces des premiers Rimlingeois. *Bulletin municipal de Rimling* 61-69.
- SCHMIT S. 2013. Quid des monnaies gauloises au Pays de Bitche. *La Revue du pays de Bitche* 14, 2-15.
- SCHMIT S. 2009. Découverte de nouveaux sites gallo-romains au pays de Bitche. *La Revue du pays de Bitche* 10, 4-23.
- SCHMIT S. 2008. Aux origines de la fortification au Pays de Bitche: réflexion sur les enceintes du Néolithique à l'Antiquité tardive. *La Revue du pays de Bitche* 9, 2-23.
- SCHMIT S. 2006. Préhistoire: de la pierre au métal... découverte de gisements mésolithiques et néolithiques dans l'ouest du canton de Volmunster à Rimling, Epping, Erching, Obergailbach. *La Revue du pays de Bitche* 7, 2-13.
- SCHMIT S. 2005. Préhistoire: découverte de gisements et stations paléolithiques dans l'ouest du canton de Volmunster à Rimling, Erching, Obergailbach. *La Revue du pays de Bitche* 6, 2-19.
- SCHMIT S., SCHNITZLER A., CHALTE D. 2017. De la Préhistoire aux Mérovingiens: inventaire des sites archéologiques du Pays de Bitche. *La Revue du pays de Bitche* 16, 2-36.

- SCHMIT S., VALOTTEAU F., WÖRLE M. 2008. Lame de hache plate en cuivre de Rimling « Kohlhecke » (département de la Moselle, France). *Bulletin de la Société Préhistorique Luxembourgeoise* 30, 63-72.
- SCHNITZLER B. 2011. Aux origines de la vigne et du vin dans les vallées du Rhin et de la Moselle: de l'époque celtique à la fin de la période romaine. *Revue d'Alsace* 137, 13-32. <https://doi.org/10.4000/alsace.1062>
- SCHNITZLER B. 2006. L'Alsace: un très riche patrimoine archéologique. Bilan de quinze ans de recherches et de découvertes. *Revue d'Alsace* 132, 7-40. <https://doi.org/10.4000/alsace.1523>
- SCHNITZLER-LENOBLE A., ARNOLD C., GUIBAL F., WALTER J.-M. 2018. Histoire de la vigne sauvage, *Vitis vinifera* ssp. *sylvestris*, en Camargue. *Ecologia mediterranea* 44, 53-66. <https://doi.org/10.3406/ecmed.2018.2029>
- SCHWARTZ D., THINON M., GOEPP S., SCHMITT C., CASNER J., ROSIQUE T., WUSCHER P., ALEXANDRE A., DAMBRINE É., MARTIN C., GUILLET B. 2005. Premières datations directes de défrichements protohistoriques sur les chaumes secondaires des Vosges (Rossberg, Haut-Rhin). Approche pédoanthracologique. *Comptes Rendus Geoscience* 337, 1250-1256. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.06.004>
- SCHWICKERATH M. 1933. Die Vegetation des Landkreises Aachen und ihre Stellung im nördlichen Westdeutschland. *Aachener Beitr. zur Heimatkunde* 13, 1-135.
- SCHWIEN J.-J. 2016. Châteaux et enceintes des Vosges du Nord. Topographie et longue durée. *Archimède* 3, 37-48.
- SELL Y., BERCHTOLD J.-P., CALLOT H., HOFF M., GALL J.-C., WALTER J.-M. 1998. L'Alsace et les Vosges, Delachaux et Niestlé. ed, La Bibliothèque du naturaliste. Paris.
- SERIEYSSOL K., CHATELARD S., CUBIZOLLE H. 2011. Diatom fossils in mires: a protocol for extraction, preparation and analysis in palaeoenvironmental studies. *Mires and Peat* 7, 1-11.
- SHOTYK W. 1988. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters. *Earth-Science Reviews* 25, 95-176. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(88\)90067-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(88)90067-0)
- SIGAUT F. 1995. De l'écobuage au pain d'épices, quelques questions sur l'histoire du seigle, in: Le seigle, Secale cereale, Histoire et ethnologie. éditions D.I.R.E, Treignes, Belgique, p. 211-250.
- SKRZYPEK E., CRUZ MERMERY D. 2007. Carte géologique harmonisée du département du Bas-Rhin (No. RP-56028-FR), Rapport géologique. BRGM.
- SUDHAUS D. 2005. Paläoökologische Untersuchungen zur spätglazialen und holozänen Landschaftsgenese des Ostschwarzwaldes im Vergleich mit den Buntsandsteinvogesen. *Freiburger Geographische Hefte* 64, 1-153.
- SUDHAUS D., FRIEDMANN A. 2015. Holocene Vegetation and Land Use History in the Northern Vosges (France). *Quaternary Science Journal*. <https://doi.org/10.3285/eg.64.2.01>

- SUGITA S. 1994. Pollen Representation of Vegetation in Quaternary Sediments: Theory and Method in Patchy Vegetation. *Journal of Ecology* 82, 881-897. <https://doi.org/10.2307/2261452>
- TAMBOER-VAN DEN HEUVEL G., JANSSEN C.R. 1976. Recent pollen assemblages from the crest region of the Vosges Mountains (France). *Review of Palaeobotany and Palynology* 21, 219-240.
- THIEBAULT S. 2012. Les disciplines paléoenvironnementales. *Archéopages. Archéologie et société* Hors-série 3, 29-31. <https://doi.org/10.4000/archeopages.451>
- THIEBAULT S. 2010. Archéologie environnementale de la France, La Découverte. ed, Archéologies de la France. Paris.
- TINNER W., HU F.S. 2003. Size parameters, size-class distribution and area-number relationship of microscopic charcoal: relevance for fire reconstruction. *The Holocene* 13, 499-505. <https://doi.org/10.1191/0959683603hl615rp>
- TINNER W., LOTTER A.F. 2001. Central European vegetation response to abrupt climate change at 8.2 ka. *Geology* 29, 551-554. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0551:CEVRTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0551:CEVRTA>2.0.CO;2)
- TINNER W., NIELSEN E.H., LOTTER A.F. 2007. Mesolithic agriculture in Switzerland? A critical review of the evidence. *Quaternary Science Reviews* 26, 1416-1431. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2007.02.012>
- TINNER W., LOTTER A.F. 2006. Holocene expansions of *Fagus silvatica* and *Abies alba* in Central Europe: where are we after eight decades of debate? *Quaternary Science Reviews* 25, 526-549. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2005.03.017>
- TRENDEL G., BARABINOT N. 1999. Les châteaux des Vosges, histoire, architecture, légendes, Tome 6 - Les châteaux autour de Bitche. Editions Pierron, Sarreguemines.
- TURNER S.D., BROWN A.G. 2004. *Vitis* pollen dispersal in and from organic vineyards. *Review of Palaeobotany and Palynology* 129, 117-132. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2003.12.002>
- VAN GEEL B. 2001. Non-pollen palynomorphs, in: SMOL, J.P., BIRKS, H.J., LAST, W.M. (Éd.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal and Siliceous indicators. Kluwer, Dordrecht, p. 99-109.
- VAN GEEL B. 1978. A palaeoecological study of Holocene peat bog sections in Germany and the Netherlands, based on the analysis of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae, cormophytes and animals. *Review of Palaeobotany and Palynology* 25, 1-120.
- VAN GEEL B., APTROOT A. 2006. Fossil ascomycetes in Quaternary deposits. *Nova Hedwigia* 82, 313-329. <https://doi.org/10.1127/0029-5035/2006/0082-0313>
- VAN GEEL B., BUURMAN J., BRINKKEMPER O., SCHELVIS J., APTROOT A., VAN REENEN G., HAKBIJL T. 2003. Environmental reconstruction of a Roman Period settlement site in Uitgeest (The Netherlands), with special reference to coprophilous fungi. *Journal of Archaeological Science* 30, 873-883. [https://doi.org/10.1016/S0305-4403\(02\)00265-0](https://doi.org/10.1016/S0305-4403(02)00265-0)

- VAN GEEL B., PLICHT J. van der, KILIAN M.R., KLAVER E.R., KOUWENBERG J.H.M., RENSSSEN H., REYNAUD-FARRERA I., WATERBOLK H.T. 1998. The sharp rise of DELTA-14C ca. 800 cal BC: possible causes, related climatic connections and the impact on human environments. *Radiocarbon* 40, 535-550.
- VANNIERE B., BOSSUET G., GAUTHIER E. 2000. Susceptibilité magnétique et indices polliniques, marqueurs de l'impact anthropique et de la dynamique fluviale dans la basse vallée du Doubs (Jura, France) entre le Ier et le VIIIe siècles après J.-C. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 331, 203-210. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)01404-X](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)01404-X)
- VOGT J. 1986. L'exploitation des gîtes de minerai de fer des plaines et collines du nord de Basse-Alsace par les Dietrich, leurs prédécesseurs et leurs concurrents. *Revue d'Alsace* 112, 223-254.
- VOIGT R., GRÜGER E., BAIER J., MEISCHNER D. 2008. Seasonal variability of Holocene climate: a palaeolimnological study on varved sediments in Lake Jues (Harz Mountains, Germany). *Journal of Paleolimnology* 40, 1021-1052. <https://doi.org/10.1007/s10933-008-9213-7>
- VON SCHEFFER C., LANGE A., DE VLEESCHOUWER F., SCHRAUTZER J., UNKEL I. 2019. 6200 years of human activities and environmental change in the northern central Alps. *E&G Quaternary Science Journal* 68, 13-28. <https://doi.org/10.5194/egqsj-68-13-2019>
- WALKER M.J.C., BERKELHAMMER M., BJÖRCK S., Cwynar L.C., FISHER D.A., LONG A.J., LOWE J.J., NEWNHAM R.M., RASMUSSEN S.O., WEISS H. 2012. Formal subdivision of the Holocene Series/Epoch: a Discussion Paper by a Working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommittee on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). *Journal of Quaternary Science* 27, 649-659.
- WANG T., SURGE D., MITHEN S. 2012. Seasonal temperature variability of the Neoglacial (3300–2500BP) and Roman Warm Period (2500–1600BP) reconstructed from oxygen isotope ratios of limpet shells (*Patella vulgata*), Northwest Scotland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 317-318, 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2011.12.016>
- WHITTLE A. 1985. Neolithic Europe: a survey, University of Cambridge Press. ed. Cambridge, New York.
- WILLIS K.J., BIRKS H.J.B. 2006. What Is Natural? The Need for a Long-Term Perspective in Biodiversity Conservation. *Science* 314, 1261-1265. <https://doi.org/10.1126/science.1122667>
- WOLTERS S. 2007. Zur spätholozänen Vegetationsgeschichte des Pfälzerwaldes - Neue pollenanalytische Untersuchungen im Pfälzischen Berg- und Hügelland. *Eiszeitalter und Gegenwart - Quaternary Science Journal* 3, 139-161.
- YELOFF D., CHARMAN D., VAN GEEL B., MAUQUOY D. 2007. Reconstruction of hydrology, vegetation and past climate change in bogs using fungal microfossils. *Review of Palaeobotany and Palynology* 146, 102-145. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2007.03.001>

ZOLITSCHKA B., BEHRE K.-E., SCHNEIDER J. 2003. Human and climatic impact on the environment as derived from colluvial, fluvial and lacustrine archives—examples from the Bronze Age to the Migration period, Germany. *Quaternary Science Reviews* 22, 81-100. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(02\)00182-8](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(02)00182-8)

Titre : Résilience des écosystèmes : approche multi-proxy de l'impact environnemental des activités humaines passées et récentes dans les Vosges du Nord (mines, verreries, activités militaires et agro-pastorales).

Mots clés : Impact humain, résilience, palynologie, microfossiles non-polliniques, géochimie, Vosges

Résumé : Cette thèse vise à étudier les impacts des activités humaines passées sur les écosystèmes et notamment sur leur résilience dans la région des Vosges du Nord, et tente de combler les lacunes concernant l'histoire ancienne des sociétés. Dans ce but, quatre zones tourbeuses ont fait l'objet d'une étude multi-proxy, qui croise l'analyse des microfossiles polliniques et non-polliniques, des particules carbonisées ainsi que l'étude des sédiments. Les résultats ont permis de reconstituer la succession forestière depuis plus de 9000 ans cal. BP, qui suit globalement celle observée en Europe de l'Ouest avec cependant la persistance du pin du fait des conditions édaphiques autour des sites. Cette étude apporte également des éléments nouveaux sur l'indigénat de l'épicéa dans les Vosges du Nord, où les premiers indices de sa présence « naturelle » sont observés bien avant les plantations du XIX^{ème} siècle, alors que

l'essence est actuellement considérée comme exotique dans les plans de gestion. Les premiers impacts anthropiques sur le couvert forestier sont visibles à partir du Néolithique initial et l'utilisation du paysage se diversifie et s'intensifie à partir de l'Âge du Fer et du Moyen Âge. Bien que les fonds de vallons et les zones humides ne soient pas épargnés, les activités humaines engendrent une forte régression de l'écosystème forestier – qui tient une place centrale dans l'utilisation du paysage – ainsi qu'une modification de sa composition spécifique. Bien que la mise en place d'un paysage morcelé ait généré une augmentation de la biodiversité, la pression anthropique a entraîné une légère perte de résilience de la forêt qui ne retrouve ses valeurs d'origine qu'après la modification de l'utilisation des paysages, les politiques de protection des forêts et les plantations des époques récentes.

Title : Ecosystems resilience: multiproxy approach of environmental past and recent human activities impact in the Northern Vosges Mountains (mines, glassware, military and agro-pastoral activities).

Keywords : Human impact, resilience, palynology, non-pollen palynomorphs, geochemistry, Vosges

Abstract : The object of this thesis is to study the impacts of past human activity on the ecosystems, particularly on their resilience in the Northern Vosges Mountains (NVM). This research also tries to fill existing gaps regarding ancient history of societies. To this end, four peaty areas were studied via a multi proxy approach that crosses multiples analyses of pollen, non-pollen palynomorph and carbonised particles, as well as the study of sediments. The results allowed us to reconstruct the forest succession from over 9000 yrs cal. BP that roughly follows the one studied in Western Europe, except for the persistence of *Pinus* that was allowed by the edaphic conditions around the sites. This study also provides new elements on the indigenous status of *Picea* in the NVM. In fact, we can observe the first traces of "natural" presence of

this tree species long before the plantations of the 19th century even though it is usually considered as exotic in the management plans. The first anthropic impacts on the forest cover were noticed from the initial Neolithic and the landscape use diversifies and increased later, from the Iron Age and the Middle Ages. Even though the valley floors and humid areas were impacted as well, Human activities creates a strong decline in the forest ecosystem – the heart of landscape use - and a modification in its specific composition. Even though the landscape was then fragmented, thus increasing biodiversity, the anthropic pressure resulted in a loss of resilience in the forest. The later only recovers its original values with the modification of landscape use, forest protection policies and new plantations in recent years.