



ArkéoMap

Analyses scientifiques des découvertes archéologiques : Etudes palynologique



ANALYSES PALYNOLOGIQUES DE 27 PRÉLÈVEMENTS RÉALISÉS EN STRATIGRAPHIE SUR LA COUPE «TÉMOIN » DE LA GROTTÉ DIACLASE DE LA « KARELSLÉ » SUR LA COMMUNE DE WALDBILLIG (LUXEMBOURG).

**CNRA
Service d'archéologie préhistorique**

Rapport d'étude palynologique

Octobre 2021

Centre National de Recherche Archéologique

Service d'archéologie préhistorique

Prélèvements réalisés dans la grotte diaclase de la « Karelsé » à Waldbillig (Luxembourg).

Références des échantillons étudiés :

Prélèvements n°1 à n°27 sur stratigraphie, « coupe témoin »

Rapport d'étude palynologique

Loïc GAUDIN

membre associé à l'UMR 6566 CReAAH et chargé de cours l'Université de Rennes 1

E-mail : loic.gaudin@arkeomap.com

Site web : arkeomap.com

Octobre 2021

*Illustration de la page de couverture : Pollen de pin (Pinus sp.), observé dans le prélèvement n°18.
Grossissement x1000. L'échelle représente 10 micromètres.*

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	4
1. OBJECTIFS ET ORIGINE DES PRELEVEMENTS.....	5
1.1. Stratigraphie	6
1.2. Datations radiocarboniques.....	7
2. METHODOLOGIE.....	8
2.1 Le protocole d'extraction utilisé.....	8
2.2 Les comptages et déterminations.....	8
2.3 Les diagrammes sporo-polliniques	9
3. RESULTATS PALYNOLOGIQUES.....	13
3.1. Les diagrammes sporo-polliniques	13
3.2. Examen critique des résultats.....	15
3.3. Description des zones d'assemblages polliniques.....	17
3.4. Description des phases écologiques.....	22
3.5. Description de la courbe du flux pollinique (concentrations polliniques exprimées en nb de grains / mL).....	23
4. INTERPRETATION, SYNTHESE DES RESULTATS.....	25
5. LISTE DES QUESTIONNEMENTS.....	29
6. BIBLIOGRAPHIE.....	30
7. ANNEXE.....	33
7.1. Détail du protocole d'extraction utilisé :.....	33
7.2. Description des échantillons avant traitement.....	36
7.3. Tableau des comptages.....	37
7.4. Etude pollinique réalisée par J. Heim en 1998.....	38
7.5. Photographies.....	39

INTRODUCTION

Ce document présente les résultats d'analyses palynologiques de 27 prélèvements réalisés en stratigraphie sur la « coupe témoin » de la grotte diaclase de la Karelslé, sur la commune de Waldbillig (Luxembourg).

Le site a été fouillé de 1991 à 1997 par le Musée d'Histoire et d'art du Grand-Duché de Luxembourg sous la direction de F. Le Brun-Ricalens, actuel chargé de direction du Centre national de recherche archéologique (CNRA) du Grand-Duché de Luxembourg.

En 2017, un programme de reprise des d'études paléobotaniques sur la grotte Karelslé a été engagé par le CNRA, sous la direction de L. Brou et F. Le Brun-Ricalens avec la collaboration de L. Gaudin (Arkéomap) et de H.-G. Naton (Géoarchéon). Il a consisté dans un premier temps à l'exploitation et à la publication par L. Gaudin (Gaudin, 2019) des analyses palynologiques inédites effectuées sur la séquence de la Karelslé par J. Heim (ancien Laboratoire de palynologie et dendrochronologie de Louvain-la-Neuve) pendant les fouilles en y intégrant les études anthracologiques de J.-M. Pernaud (2001).

Au cours de l'été 2019, une campagne de prélèvements palynologiques et sédimentaires a été entreprise par l'équipe sur la « coupe témoin », en parallèle d'anciens prélèvements réalisés par Jean Heim (série de 8 prélèvements de A à H, Fig. 10). Ces premiers prélèvements avaient fait l'objet d'analyses polliniques en 1998 par J. Heim, mais aussi d'analyses anthracologiques par J.-M. Pernaud (2001). Ils se révélèrent d'autant plus intéressants que des datations radiocarbone avaient permis d'attribuer certains niveaux au Mésolithique ancien (Préboréal).

L'objectif de la présente étude est de réaliser un diagramme pollinique complet de la stratigraphie de la coupe témoin, avec un meilleur niveau de détail que l'étude de J. Heim. Pour la présente étude, une série de 27 prélèvements a été réalisée sur environ 1,7 mètres de puissance.

Les échantillons ont été réalisés dans des niveaux à dominance minérale, sédiment à priori plutôt défavorables à la conservation pollinique. Pourtant la première étude réalisée par J. Heim en 1998 suivie de tests sur les prélèvements de 2019 révélèrent un potentiel pollinique intéressant (Gaudin, 2020).

Ce rapport fait état des observations polliniques complètes des 27 prélèvements.

1. OBJECTIFS ET ORIGINE DES PRELEVEMENTS

Les prélèvements ont été réalisés le long d'une colonne stratigraphique sur la coupe témoin située du côté sud de la grotte diaclase (Fig. 1 et 2). Les 27 prélèvements ont été disposés de façon à percevoir l'évolution de la composition pollinique de façon la plus détaillée possible par rapport à l'étude faite par J. Heim en 1998 (échantillons notés « a » à « h », Fig. 10). Le sédiment étant très compact, nous avons dû utiliser un emporte-pièce pour extraire le sédiment sur une hauteur d'environ 1,7 mètres.



Figure 1. Photographie de la stratigraphie avec les positions des différents prélèvements de 2019 notés en vert. Notons les prélèvements réalisés par Heim en 1998, numérotés de « a » à « h » en rouge. Les prélèvements pour les datations sont figurés dans les carrés blancs.

1.1. Stratigraphie

Les prélèvements repositionnés par H.-G. Naton sur le relevé stratigraphique de la coupe témoin sont situés à des altitudes allant de -3,97 mètres à -5,71 mètres (Fig. 2). Les prélèvements ont été positionnés de façon à recouper des niveaux attribués au Mésolithique ancien.

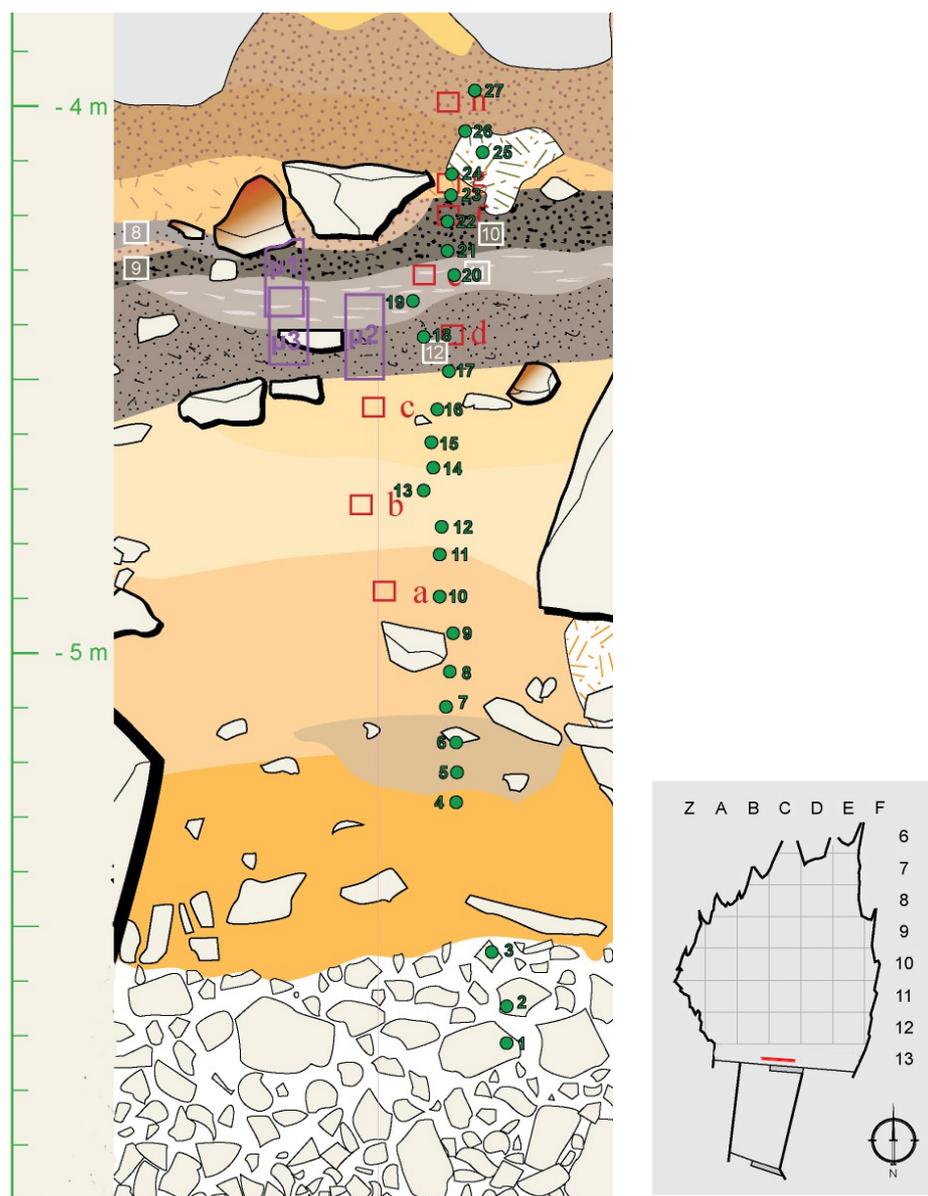


Figure 2. Détail du relevé de la stratigraphie de la coupe témoin et position à l'intérieur de la grotte de la Karelslé. © MNHA, Luxembourg et V. Stead-Biver et H.-G. Naton – Géoarchéon.

1.2. Datations radiocarboniques

ECHANTILLONS n°	ANNEE	MATERIEL	STRATIGRAPHIE	LAB_REF	DATE PB	95,4% probability (Cal. BC)
Waldbillig-Karelslé – Ech n°8	1999	charbon	M1	Beta-131912	9450 ± 80 BP	Cal BC 9135 à 8980 et Cal BC 8930 à 8545
Waldbillig-Karelslé – Ech n°9	1999	charbon	M3a	Beta-131913	9560 ± 70 BP	Cal BC 9210 à 8705
Waldbillig-Karelslé – Ech n°10	1999	charbon	M3b	Beta-131914	9970 ± 80 BP	Cal BC 9745 à 9255
Waldbillig-Karelslé – Ech n°11	1999	charbon	M4	Beta-131915	9850 ± 70 BP	Cal BC 9375 à 9215
Waldbillig-Karelslé – Ech n°12	1999	charbon	M5	Beta-131916	9830 ± 80 BP	Cal BC 9375 à 9195

Figure 3. Tableau résumant l'ensemble des datations radiocarboniques réalisées en 1999 sur des fragments charbonneux de la coupe témoins. Les numéros des échantillons correspondent aux numéros indiqués en blanc sur le relevé stratigraphique de la figure 2.

Trois de ces cinq datations concernent directement des couches qui ont fait l'objet de prélèvements palynologiques : les prélèvements pour datation n°10, n°11 et n°12 ont été réalisés à proximité immédiate des prélèvements palynologiques n°23 à n°17. Les trois datations apparaissent dans un ordre « inversé » par rapport à la stratigraphie, mais compte tenu des marges de datations possibles cela ne pose pas de problème d'interprétation majeur.

Ces trois analyses radiocarbonées indiquent des fourchettes de datation qui se recoupent allant de 9745 à 9195 cal BC.

2. METHODOLOGIE

2.1 Le protocole d'extraction utilisé

L'extraction pollinique a été réalisée au sein du laboratoire de l'UMR CNRS 5805 EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux) à l'université de Bordeaux.

Le protocole utilisé est détaillé en annexe (chapitre 7.1).

2.2 Les comptages et déterminations

Les pollens ont été observés au sein du laboratoire ArkéoMap. L'observation des concentrés polliniques a été réalisée sous microscope optique à immersion au grossissement x1000 (microscope Olympus CX40).

Les outils utilisés pour les déterminations sont de plusieurs sortes :

- des lames de référence du Laboratoire de l'UMR 6566, de pollens actuels portant principalement sur la flore hygrophile des marais,
- des clichés photographiques pris au microscope optique et électronique,
- des atlas photographiques « pollens et spores d'Europe et d'Afrique du Nord » (Reille, 1992) et « Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete » (Beug, 2004).

Le nombre de grains de pollens et de spores comptés par échantillon peut être variable en fonction des conditions de conservation et de la nature des sédiments. Nous avons cherché dans la mesure du possible à obtenir un nombre minimum de 300 grains par échantillon. En effet, ce nombre est préconisé dans de nombreux travaux sur le sujet qui précisent qu'au « delà de 300 l'information ne s'accroît que dans des proportions infimes » (Reille, 1990).

Nous avons aussi calculé des fréquences polliniques absolues afin d'estimer le nombre de grains par volume (cm³) de sédiment. Nous nous sommes basés pour cela sur une méthode préconisant l'introduction de pastilles de spores de Lycopodes au nombre connu dans les préparations (Stockmarr, 1972) (cf. Fig. 8 pour le détail des traitements effectués).

Remarque par rapport à la détection des pollens de « Cerealia type » :

La différenciation entre pollens issus de Poacées « sauvages » et Poacées « cultivées » (céréales) repose sur des critères biométriques (Heim, 1970 ; Visset, 1974 ; Chester P. I. et Ian Raine, 2001). Afin de limiter au maximum les erreurs de détermination, seuls les pollens de Poacées dont la taille est comprise entre 45 et 60µm, et dont le diamètre extérieur du pore aréolé est supérieur à 10µm peuvent être considérés comme étant des « céréales type » (Chester P. I. et Ian Raine, 2001).

Ces critères anatomiques ont cependant été remis en cause par certains chercheurs (Planchais N., 1971 ; Heim J., 1970 ; Lopez Saez *et al.*, 2003) qui évoquent la ressemblance dimensionnelle entre les pollens de céréales et ceux de Poacées naturels (ex. genre *Glyceria sp.*, *Elymus sp.*, *Agropyrum sp.*).

Aussi, lorsque des grains de « type céréale » sont observés de manière sporadique il est prudent avant de les interpréter comme céréales, de s'intéresser à l'ensemble des indices anthropiques (ex. ouverture du paysage) ainsi que des cortèges floristiques de plantes adventices (ex. *Centaurea sp.*, *Rumex sp.*) ou de plantes rudérales (ex. Urticacées, Plantaginacées) qui peuvent rendre cohérente ou non la détermination.

Les taxons « *Cerealia type* » et « *Secale type* » indiqués dans les diagrammes du rapport correspondent à ces types de pollens. Ils ne concernent que quelques grains identifiés dans les prélèvements n°26 et n°27.

Remarque par rapport à la détection des microfossiles non-polliniques (MNP) :

Le parcours des lames polliniques permet souvent d'observer des microfossiles non-polliniques. Ils peuvent être d'origines diverses : spores algales, ascospores fongiques, fructifications, restes de métazoaires, œufs ou kystes de parasites, ...

Il n'est pas toujours possible de déterminer ces microfossiles. Néanmoins, nous nous sommes basés sur les inventaires de Van Geel *et al.* (2006) et C. Cugny (2011) pour identifier certains microfossiles et ainsi compléter l'interprétation des résultats polliniques. La typologie adoptée est celle initiée par B. van Geel, réutilisée et complétée par C. Cugny (2011).

Ces microfossiles non-polliniques sont indiqués dans le diagramme de la figure 5.

2.3 Les diagrammes sporo-polliniques

Les diagrammes sporo-polliniques (spores et pollens) ont été réalisés à l'aide du logiciel Tilia version 2.6.1 (Grimm E. Tilia, Version 2.6.1, 2019) (Fig. 5 et Fig. 4).

Pour chaque niveau, les pourcentages de chaque taxon (pollens, spores et microfossiles non polliniques) sont calculés par rapport à une somme de base, correspondant dans cette étude, exclusivement à la somme des pollens (Fig. 4).

La question de la prise en compte, ou pas, des spores dans la somme de base n'est pas sans poser quelques problèmes. L'exemple de *Sphagnum sp.* a été étudié par J. Heim (1970) qui a constaté que la production de spores de sphaigne pouvait varier sans concordance évidente avec le couvert végétal du site considéré. Plus généralement, les Ptéridophytes et les Bryophytes présentent une sporulation souvent difficile à interpréter. Aussi, les spores sont généralement exclues de la somme de base (Voetzel, 1987 ; Barbier, 1999 ; Ouguerram, 2002). Pour notre part, les caractéristiques de production et de dispersion des spores étant différentes des caractéristiques polliniques, nous avons donc aussi choisi d'exclure les spores de la somme de base.

Les diagrammes sont réalisés à partir de ces pourcentages et les échantillons analysés apparaissent en lignes.

Sur ces diagrammes figurent de la gauche vers la droite :

- En ordonnée du diagramme apparaissent la liste des échantillons (désignés par les numéros des prélèvements de 1 à 27),
- la lithologie de la séquence sédimentaire correspondant aux unités représentées dans le relevé stratigraphique (Fig. 2),
- l'ensemble des fréquences relatives de chaque taxons d'arbres puis des arbustes déterminés lors du comptage,

- un diagramme de type « Iversen », synthétisant les taux de pollen d'arbres vis à vis des pollens de plantes herbacées et de plantes aquatiques. La courbe continue « Somme des pollens d'arbres » / « Somme des herbacées » permet d'estimer l'évolution des parts relatives des végétations boisées vis-à-vis des végétations herbacées dans le paysage environnant. Les pollens de plantes aquatiques n'étant représentés que par quelques occurrences, la courbe de la somme des « plantes aquatiques » présente une amplitude très faible dans ce diagramme,
- les courbes individuelles continues en pourcentages relatifs des taxons polliniques de plantes herbacées puis des plantes aquatiques. Au sein des herbacées, les taxons sont ordonnés par affinités écologiques,
- les courbes individuelles continues des spores de Ptéridophytes, de Bryophytes, dont les monolètes,
- les microfossiles non polliniques d'origines diverses : spores algales, ascospores fongiques, fructifications, restes de métazoaires, œufs ou kystes de parasites (Fig. 5),
- les informations relatives aux micro-charbons sont représentées sous la forme de concentrations absolues en nombre de fragments par mL (Fig. 4),
- la zonation : construite à partir des variations polliniques. Afin de faciliter l'interprétation d'une séquence pollinique, il est habituel de regrouper les échantillons en zones. On distingue les zones d'assemblages polliniques, les phases écologiques, les chronozones. Compte tenu de la faible résolution du diagramme, nous n'avons représenté que les zones polliniques locales.

- *Les zones d'assemblages polliniques (ou zonations locales) :*

Ce premier degré de zonation est établi en fonction de la variation du pourcentage d'au moins deux taxons locaux (Cushing, 1963). Elles sont désignées par les lettres de l'alphabet (a, b, c,...). Ces zonations locales permettent d'estimer l'évolution de la végétation locale autour du sondage pollinique. Dans le cadre de cette étude 5 zones d'assemblages polliniques ont été établies (Fig. 5).

- *Les phases écologiques :*

Ce niveau hiérarchique de la zonation est composé des zones d'assemblages polliniques. Il est établi en fonction de la variation significative des taxons dominants et permet ainsi d'appréhender l'évolution des formations végétales majeures. Leurs dénominations sont généralement exprimées par les trois premières lettres en majuscules du site considéré, suivies d'un chiffre. Dans la séquence étudiée, le nombre de niveaux est relativement faible (5 niveaux). Aussi, nous n'obtenons pas toujours d'évolution suffisamment détaillée pour définir ou au contraire regrouper de zones polliniques. Compte tenu du faible nombre de niveaux, les phases écologiques se confondent parfois avec les zones d'assemblages polliniques (parfois représentées par un seul niveau). Trois phases écologiques ont été établies (WAL1, WAL2 et WAL3) (Fig. 5).

- *Les chronozones :*

Cette zonation repose sur les phases écologiques et les datations radiocarboniques absolues. Il s'agit donc d'une chronologie absolue (Puertas, 1997) permettant de resituer l'ensemble des séquences par rapport aux périodes climatiques régionales. La reconnaissance de ces chronozones nécessite une étude bibliographique régionale. Ces zones sont généralement représentées à l'aide de chiffres romains. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes notamment référés aux travaux de van Mourik (Van Mourik *et al.* 2016 et 2017) concernant les études polliniques des marais de Dauwelsmuer et de Roudbaach. Nous avons cherché des

correspondances avec les chronozones utilisées dans ces études afin d'identifier les grandes périodes climatiques (Préboréal, Boréal, Atlantique, Subboréal, Subatlantique).

Plusieurs autres études ont aussi pu être consultées pour établir des correspondances. Les études polliniques d'Echternach (Guiot et Couteaux, 1992) mais aussi d'Heffingen-Loschbour (Brou *et al.*, 2015) notamment, restent des références pour aborder les périodes du Préboréal et du Boréal. Ces chronozones sont représentées dans la figure 4.

- un dendrogramme réalisé à l'aide du programme CONISS

En plus des zonations établies sur la lecture du contenu pollinique, il est intéressant de déterminer des zones polliniques de façon statistique en se basant sur les fluctuations significatives des courbes polliniques (spores et microfossiles non polliniques exclus). Pour cela, à titre informatif et en complément de la lecture pollinique, nous avons réalisé un dendrogramme à l'aide du programme CONISS du logiciel Tilia (Grimm E.C, 1987). Parmi les calculs disponibles pour construire ce dendrogramme, nous avons retenu la méthode « d'Edwards & Cavalli's chord distance » ou distance harmonique, jugée la plus pertinente selon Grimm E.C (1987).

En vue de simplifier l'interprétation des résultats polliniques, il est désormais courant d'avoir recours à des diagrammes synthétiques appelés aussi parfois « diagrammes d'anthropisation » (Fig. 4). Ce sont des diagrammes polliniques simplifiés dans lesquels apparaissent les courbes cumulant les pourcentages des principaux taxons liés aux activités agro-pastorales ou indices polliniques d'anthropisation (IPA). La fiabilité de ces indices est attestée par de nombreux travaux (Behre, 1981 ; Faegri et Iversen, 1989 ; Richard, 1999 ; Gauthier, 2000 ; Barbier, 1999).

Les indices polliniques d'anthropisation (IPA) retenus pour cette étude sont :

- Les sommes des taux de pollens des céréales (dont seigle),
- les sommes des taux de pollen de plantes autochtones mais favorisées par les activités humaines. Il s'agit d'une part des plantes adventices ou messicoles correspondant aux végétaux associés aux cultures (*Centaurea sp.*, *Centaurea cyanus*),
- les sommes des taux de plantes rudérales correspondent aux autres plantes favorisées par les activités humaines : zones piétinées, espaces eutrophisés (*Plantago sp.*, *Plantago lanceolata*, *Plantago major*, *Polygonum aviculare*, Brassicaceae, Chenopodiaceae, Caryophyllaceae, *Artemisia sp.*, Asteraceae, (*Crepis sp.*, *Cirsium sp.*), Apiaceae, Ranunculaceae, *Trifolium type*, Convolvulaceae),
- les sommes des taux de plantes de landes (*Calluna sp.*, Fabaceae).

A ces indices, nous avons ajouté :

- une courbe représentant la diversité du nombre de taxons polliniques et de spores identifiés pour chaque niveau. En effet, la diversité peut être un indicateur des « perturbations » des dynamiques végétales, perturbations potentiellement associées aux activités humaines (Gaudin, 2004),
- une courbe indiquant le nombre de pollens pris en compte comme somme de base (pollens d'arbres, herbacées et aquatiques) pour chaque spectre pollinique,
- les concentrations absolues de pollens et pollens + spores (en nombre de grains / mL de sédiment) et de micro-charbons.

Dans ces graphiques simplifiés sont aussi représentés sur la gauche les courbes des principaux taxons d'arbres et le diagramme des taux de pollens d'arbres (AP) vis à vis des pollens d'herbacées et aquatiques (NAP) (Fig. 4).

Remarques :

- Lorsqu'un taxon n'est représenté seulement que par une ou deux occurrences, il est matérialisé sur le diagramme par un ou deux points.
- Les datations radiocarbone réalisés sur certains prélèvements ont été positionnés sur le diagramme et représentés sous forme de datations BP. Ces datations sont détaillées dans le tableau de la figure 3.

3. RESULTATS PALYNOLOGIQUES

3.1. Les diagrammes sporo-polliniques

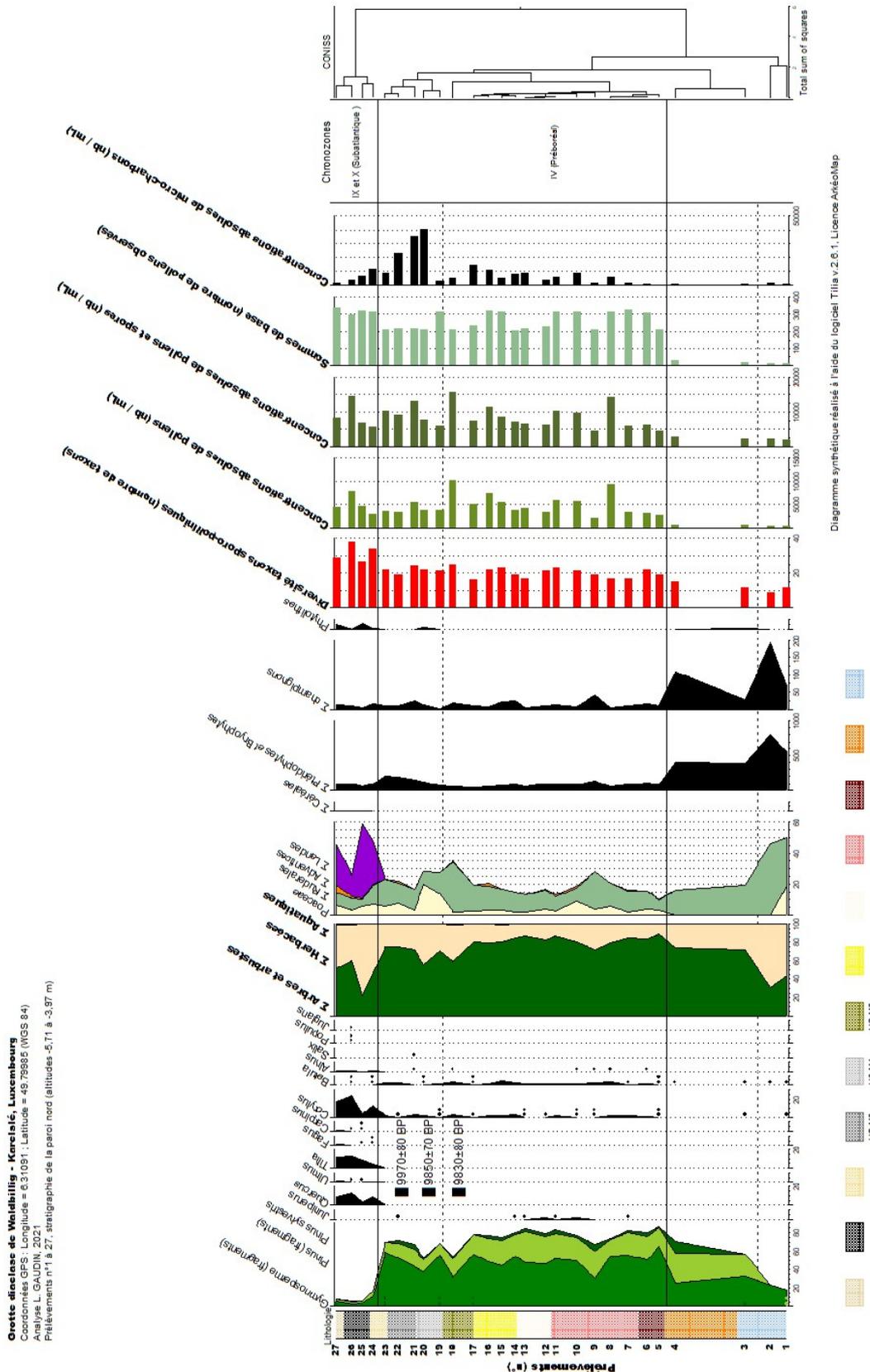


Figure 4. Diagramme pollinique simplifié montrant les principaux taxons d'arbres, Indice Pollinique d'Anthropisation et divers indicateurs (flux polliniques, sommes de base, diversités taxonomiques) de la grotte diaclyse de la Karelslé (Waldbillig, Luxembourg). Série de 27 prélèvements réalisés dans la partie sud de la coupe témoin, répartis entre les altitudes de -5,71 mètres à - 3,97 mètres.

3.2. Examen critique des résultats

L'observation des échantillons a livré des résultats globalement assez pauvres en microrestes. Les concentrations absolues en pollens sont comprises entre 250 et 10400 pollens / mL ce qui est peu comparé aux concentrations obtenues dans des dépôts organiques, souvent supérieurs à 50000 pollens / mL.

Exception faite des quatre prélèvements situés en fond de colonne (prélèvements n° 1 à n°4) où les extractions révélèrent des contenus de mauvaises qualités (les concentrations polliniques sont inférieures à 600 pollens / mL), les analyses des 23 autres prélèvements ont systématiquement permis l'observation d'au moins 300 grains de pollens et spores. Compte tenu de la redondance des résultats, nous n'avons pas toujours mené les observations jusqu'à atteindre 300 pollens par échantillons. 300 pollens ont été identifiés pour 12 des 23 niveaux, au moins 200 pollens ont été observés pour les 11 autres niveaux (cf. Fig. 6).

On constate des diversités assez « moyennes » allant de 17 à 39 taxons. Les quatre prélèvements situés dans les niveaux supérieurs sont apparus un peu plus diversifiés (de 28 à 34 taxons pour les prélèvements en position sommitale et 9 à 25 taxons pour les autres niveaux). Ce sont là aussi des diversités relativement « moyennes » par rapport à des contextes de conservation plus favorables tels que les milieux tourbeux.

La détection systématique et relativement importante des spores de Lycopodes exotiques, introduits dans les volumes extraits (de 107 à 927 Lycopodes comptés), témoigne de la réussite du traitement physico-chimique d'extraction du matériel sporo-pollinique (Fig. 6). Ce constat montre aussi que la faiblesse du stock pollinique observée pour ces échantillons tient à la pauvreté des sédiments et non à la méthodologie employée pour l'extraction.

Le temps de contact entre « la pluie pollinique » et les couches archéologiques est un facteur qui a pu jouer pour expliquer ces résultats. Tout dépend de la durée de fonctionnement, de la dynamique (vitesse) de sédimentation.

L'autre facteur important est le contexte de conservation pollinique. De nombreuses « enveloppes polliniques » et débris polliniques ont été constatés sans qu'il soit toujours possible d'identifier les taxons. Certains grains sur-représentés correspondent à des taxons résistants à la corrosion comme par exemple les Cichorioïdées (*Crepis-type*, *Cirsium-type*), les spores monolètes (Fig. 5). La nature du sédiment à dominance minérale, correspond à des contextes où la conservation pollinique est souvent aléatoire. Le maintien d'une ambiance anaérobie est un facteur essentiel. Dans le cas ci-présent, les observations laissent penser que les pollens se sont trouvés à un moment donné dans des contextes aérobies propices à l'oxydation biologique ou physico-chimique.

Code des prélèvements	Nombre de pollens comptés	Nombre de spores et de Lycopodes introduits comptés	Concentration absolue pollen spores	Concentration absolue pollen uniquement	Etat de conservation	Diversité taxonomique	Ind estimatif de qualité de conservation
27	339	640	8250	4370	Moyen	29	2
26	395	653	17189	10398	Bon	39	2
25	421	583	8005	5781	Moyen	28	2
24	308	600	5555	2852	Moyen	34	3
23	210	647	10419	3382	Moyen	22	3
22	217	623	9145	3185	Moyen	19	3
21	212	525	13092	5287	Moyen	24	3
20	208	455	7909	3615	Moyen	22	3
19	314	501	5881	3686	Moyen	21	3
18	210	318	15490	10229	Moyen	25	3
17	231	334	7140	4938	Moyen	16	3
16	323	503	11326	7273	Moyen	22	3
15	309	495	8720	5443	Moyen	23	3
14	205	381	6926	3727	Moyen	19	3
13	212	334	6540	4151	Moyen	17	3
12	228	433	6178	3253	Mauvais	21	3
11	312	570	10362	5672	Moyen	23	3
10	312	550	9853	5589	Moyen	21	3
9	206	489	4576	1928	Mauvais	19	3
8	312	475	14217	9338	Moyen	17	3
7	327	591	5868	3247	Mauvais	17	4
6	304	615	6126	3028	Mauvais	22	4
5	206	360	4477	2562	Mauvais	19	4
4	31	154	522	2715	Très mauvais	15	5
3	21	103	600	2107	Très mauvais	12	5
2	13	118	383	2268	Très mauvais	9	5
1	16	104	520	1841	Très mauvais	12	5

Figure 6. Tableau synthétisant les sommes, les concentrations absolues en spores et pollens (en nb/mL de sédiment) ainsi que la diversité taxonomique de chaque prélèvement. Un indice de qualité de conservation pollinique est proposé (l'indice de 1 correspondant à une très bonne conservation, l'indice 5 correspondant à un résultat très défavorable).

3.3. Description des zones d'assemblages polliniques

Cinq zones locales, chacune désignée par une lettre ont pu être mises en évidence :

- Zone a (Prélèvements n°1 et 2)

Cette zone correspond à deux spectres polliniques. Malgré le parcours de plusieurs lames très peu de pollens y ont été observés : seulement 13 et 16 pollens au total. La concentration pollinique est très faible (de l'ordre de 250 pollens / mL) (Fig. 6). De plus, la composition est à considérer avec précaution à cause de très probables conservations différentielles. En effet, les grains plus résistants, tels que les pollens de Cichorioïdées (*Crepis type*) et spores monolètes apparaissent sur-représentés.

Le spectre est marqué par des taux de pollens d'arbres relativement faibles par rapport au reste du diagramme (environs de 30 à 40 %). Toutefois, compte tenu du très faible nombre de pollens observés et la conservation différentielle de certains pollens notamment herbacées (*Crepis type*), il faut considérer ces proportions avec prudence. Le paysage relativement ouvert qui semble se dégager est probablement davantage lié aux conservations différentielles des pollens de Cichorioïdées (*Crepis type*), plutôt qu'une réalité paléo-paysagère.

La couverture arborescente est représentée essentiellement par des pollens de résineux (Gymnosperme), souvent sous la forme de fragments polliniques. Ce sont des taxons qui combinent des productions et dispersions polliniques importantes. Ils pourraient donc potentiellement être d'origines lointaines. Quelques occurrences de bouleau (*Betula sp.*) et de noisetier (*Corylus sp.*) sont à noter.

Les végétations herbacées sont représentées par des pollens de Cichorioïdées (*Crepis type*) et de Poacées.

Les taux de spores monolètes et de certains microfossiles non polliniques (champignons mycorhizien : amérospores Type HdV 207) sont aussi à noter. Ils sont difficilement interprétables compte tenu des sporulations souvent aléatoires.

- Zone b (Prélèvements n°3 et 4)

Deux spectres polliniques sont compris dans cette palynozone. Comme pour la zone a, malgré le parcours de plusieurs lames très peu de pollens ont été observés, seulement 21 et 31 grains.

L'ensemble se démarque de la zone précédente par des diversités (entre 12 et 15 taxons) et des flux polliniques un peu meilleurs mais restant très faibles (environ 500 pollens / mL de sédiment) (Fig. 6 et Fig. 4). D'autre part, la proportion des pollens d'arbres apparaît en nette hausse par rapport à la zone a, avec des valeurs de l'ordre de 80 %. Cette hausse s'explique par la baisse marquée des proportions de pollens de *Crepis type* et des Poaceae.

Les pollens d'arbres correspondent à du résineux, essentiellement du pin (*Pinus sp.* dont *Pinus type sylvestris*). Ces formations de résineux sont toutefois difficiles à cerner à cause de modes de diffusion et de production importantes. Quelques occurrences de noisetier (*Corylus sp.*) et bouleau (*Betula sp.*) sont à noter. Essences pionnières par excellence, le noisetier et bouleau pourraient témoigner de boisements clairs, peut-être d'espaces en cours de reboisement.

Le cortège des herbacées est représenté par quelques occurrences de Poaceae, de Cichorioïdées (*Crepis type*) et Cyperaceae.

Comme pour la zone a, les taux de spores monolètes (dont *Polypodium sp.*) et de certains microfossiles non polliniques (microrestes fongiques : amérospores Type HdV 207 et Dictyospores – Type TM329) ont été observés en quantité. Compte tenu des sporulations souvent aléatoires et de probables conservations différentielles, ils sont difficilement interprétables. De plus, la significativité écologique des restes fongiques n'est pas claire (Cugny, 2011).

Compte tenu du faible nombre de pollens observés et de la mauvaise conservation pollinique, les résultats de cette palynozone sont à considérer avec précaution.

– Zone c (Prélèvements n°5 à 18)

Cette palynozone comprend 14 prélèvements. On constate désormais des concentrations polliniques oscillant entre 2000 et 10000 pollens / mL et des diversités allant de 17 à 25 taxons sporo-polliniques (Fig. 4 et 6). Ces résultats seraient considérés comme assez « moyens » en contextes favorables (ex. tourbières). Toutefois, comparés aux palynozones précédentes, ces indicateurs montrent des compositions sporo-polliniques en qualité et quantité nettement meilleures.

Des micro-charbons ont régulièrement été observés à l'intérieur des 14 prélèvements. Les concentrations sont relativement faibles en comparaison avec la palynozone d (Fig. 4), mais leur présence est systématique.

Même si des différences, notamment de flux polliniques sont constatées, les 14 compositions sporo-polliniques apparaissent assez semblables.

La zone se caractérise par des taux de pollens d'arbres fluctuant entre 70 et 90%. On constate une baisse de ces taux (env. 60%) en toute fin de zone en liaison direct avec l'augmentation marquée du taux de *Crepis-type* au niveau du prélèvement n°18.

Les fréquences polliniques des principaux arbres restent globalement stables. Les résineux sont majoritaires : fragments de résineux (env. 30 à 50%), *Pinus sp.* (env. 15 à 25%), *Pinus type sylvestris* (env. 1% à 10%) en plus de quelques occurrences de sapins (*Abies sp.*) et de genévriers (*Juniperus sp.*). Ces derniers taxons sont surtout identifiés dans les prélèvements n°9 à n°15. Les feuillus sont aussi détectés par l'intermédiaire de quelques grains de bouleau (*Betula sp.*) et de noisetier (*Corylus sp.*) observés en continu. Ils traduisent l'existence de boisements clairs. Quelques pollens d'aulne (*Alnus sp.*) sont aussi détectés. Ils proviennent probablement de boisements hygrophiles où ils ont pu être associés aux noisetiers et aux bouleaux. Ces boisements de feuillus ne sont pas bien perçus. Ils étaient soit peu développés soit éloignés ou soit masqués par la végétation locale à priori composée majoritairement de résineux.

Les végétations herbacées sont peu représentées. Elles sont composées essentiellement de plantes appartenant à la famille des Cichorioïdées (*Crepis-type*) et de Poacées. Compte tenu de la conservation différentielle des Cichorioïdées, il faut nuancer le caractère dominant de cette famille de plantes dans le paysage.

Au regard des occurrences polliniques observées, quelques formations herbacées peuvent être suggérées : on détecte des pollens de Poacées accompagnées d'attestations typiques de végétations apparentées à des « friches - espaces dénudés - steppes » (Asteraceae dont *Cirsium-type*, *Artemisia sp.*, Cichorioïdeae dont *Crepis-type*, Chenopodiaceae, Caryophyllaceae, Brassicaceae, *Polygonum aviculare-type*). Dans une moindre mesure, des formations de prairies hygro- à mésophiles semblent aussi présentes dans le paysage (Cyperaceae, Rubiaceae, Asteraceae, dont *Centaurea type nigra*, Apiaceae, Ranunculaceae, *Polygonum aviculare-type*, Juncaceae, *Equisetum*).

De nombreuses spores sont observées. Ils n'est pas toujours possible de déterminer les fougères (Ptéridophytes) et mousses (Bryophytes) auxquelles elles correspondent (ex. spores monolètes, et spores trilètes). Toutefois, quelques types de spores ont pu être reconnus. Le genre *Asplenium* (ex. la Capillaire) ressort de façon continue. Le genre *Polypodium* pourrait correspondre au Polypode vulgaire. Ces genres correspondent à de petites fougères vivant plutôt dans des stations ombragées, souvent fraîches (Rameau *et al.*, 1989). Le contexte local des éboulis rocheux a pu être favorable au développement de ces fougères.

Enfin, quelques rares grains de plantes aquatiques (*Lemna sp.*, *Sagittaria sp.*) ont aussi été observés.

- Zone d (Prélèvements n°19 à n°23)

Cette zone correspond à cinq spectres polliniques. Comme pour les niveaux précédents, la composition pollinique est soumise à des conservations différentielles (pollens de Cichoroidées : *Crepis*-type et spores monolètes sur-représentées). Les flux polliniques enregistrés (env. 3000 à 5000 pollens / mL) et la diversité taxonomiques (19 à 24 taxons) apparaissent stables par rapport à la palynozone c. En revanche, on constate des concentrations en micro-charbons, dont des fragments de trachéides, très importants pour les prélèvements n°20, n°21 et n°22 (Fig. 4).

Le taux de pollens d'arbres est en léger retrait par rapport à la zone c. On constate désormais des taux fluctuant entre 60 et 75%. On retrouve la dominance des résineux (fragments de Gymnosperme, pin : *Pinus sp.* dont *Pinus type sylvestris* et genévrier : *Juniperus sp.*) accompagnés de quelques pollens de feuillus : bouleau (*Betula sp.*), noisetier (*Corylus sp.*), aulne (*Alnus sp.*) et saule (*Salix sp.*). La très faible proportion des pollens de feuillus (environ 5%) est dans la continuité de ce qui a été observé pour la palynozone c.

Les grands traits du paysage boisé sont donc semblables à ce que nous avons décrit pour la zone c. A savoir, un environnement fermé, essentiellement boisé de résineux (pins) et l'existence de façon plus ou moins lointaine de boisements clairs composés de noisetiers et de bouleaux. Des boisements hygrophiles représentés par des occurrences d'aulne, de saule, voire aussi de noisetier et de bouleau devaient ponctuer le paysage, probablement en fond de vallée.

L'absence complète de taxons caractéristiques de la chênaie diversifiée est à noter.

La végétation herbacée, en légère augmentation par rapport à la zone c, se caractérise par une augmentation des taux de Poacées, mais aussi des spores (spores monolètes : Ptéridophytes et Bryophytes) et notamment du genre *Asplenium* (Fig. 4 et 5).

L'augmentation brusque des concentrations de micro-charbons à l'intérieur des prélèvements n°20, n°21 et n°22 témoigne probablement d'incendies ayant localement ouvert le paysage situé en amont, sur le plateau. Toutefois, cela ne semble pas avoir impacté l'évolution de la composition palynologique de façon majeure, puisque les grands traits paléopaysagers apparaissent globalement stables (taux de pollens d'arbres, flux polliniques, diversité taxonomique et dominance des résineux par rapport aux essences pionnières stables). Seuls, les quelques « ressauts » des taux de Poaceae, de spores monolètes et d'*Asplenium sp.* pourraient être mis relation avec ces ouvertures locales. Notons aussi que le mode de diffusion des pollens de résineux, très anémophiles, intègre une information paléopaysagère sur une échelle régionale. Les phénomènes locaux ont donc peut-être été « compensés » par l'omniprésence des pollens de résineux (pins) de provenance régionale.

En ce qui concerne la composition des végétations herbacées, les formations des prairies hygro- à mésophiles semblent les mieux représentées (Poaceae, Cyperaceae, Campanulacea, Rubiaceae, Asteraceae, dont *Centaurea type nigra*, Apiaceae, Ranunculaceae, *Trifolium sp.*, Juncaceae, *Equisetum sp.*). Des formations de « friches - steppes » peuvent aussi être interprétées avec les pollens de Poaceae, *Artemisia sp.*, Asteraceae (*Cirsium/Cardus-type*), Cichorioïdeae (*Crepis-type*), Brassicaceae, *Campanula sp.*, *Plantago sp.* et *Trifolium sp.*

Les végétations de mousses et de fougères, dont les genres *Asplenium* et *Polypodium* sont de nouveau observées. Les proportions de ces spores sont en augmentation par rapport à la zone c, ce qui pourrait être associé à l'hypothèse de phénomènes d'incendies et d'ouverture de la végétation locale.

L'ensemble de ces formations végétales herbacées avait déjà été identifié dans la palynozone c. En revanche, nous notons l'absence des pollens de plantes aquatiques dans cette zone d.

- Zone e (Prélèvements n°24 à n°27)

Cette zone correspond aux analyses des quatre prélèvements situés au sommet de la série. Ces prélèvements ont permis d'obtenir des concentrations de pollens et des diversités taxonomiques (de 28 à 39 taxons) un peu meilleures que pour les zones précédentes. Entre 300 et 400 pollens ont été observés pour chacun des quatre échantillons (Fig. 4).

De plus, les pollens de Cichorioïdées et spores monolètes, considérés comme plus résistants à la corrosion, apparaissent moins « sur-représentés » que pour les zones précédentes. Les compositions polliniques de ces niveaux semblent donc moins sujettes aux conservations différentielles.

L'ensemble de ces indices vont dans le sens d'une image paléoenvironnementale de « meilleure qualité » que pour les précédentes palynozones.

Le taux de pollens d'arbres est globalement en retrait par rapport à la zone d. Il fluctue autour de 50% et subit une baisse marquée au niveau du prélèvement n°24 (environ 25%). Cette baisse ne profite pas aux herbacées (notamment Poaceae et Cichorioïdeae dont *Crepis type*) dont les taux sont aussi en léger retrait, mais plutôt aux bruyères (*Calluna sp.*) qui montrent des taux importants oscillant autour de 20% et même un pic à 60% pour le prélèvement n°25 (Fig. 5).

Ce résultat correspond à un paysage plutôt ouvert, en contraste donc avec la palynozone d.

En ce qui concerne la composition des boisements, le contraste est là aussi assez marqué. Les boisements de la chênaie mixte (*Quercus sp.*, *Tilia sp.*, *Ulmus sp.*, *Carpinus sp.*, *Betula sp.*, *Corylus sp.*) et probablement de la chênaie-hêtraie (*Quercus sp.*, *Fagus sylvatica*, *Betula sp.*, *Corylus avellana*) sont désormais les forêts dominantes. Le noisetier (*Corylus avellana*) et le bouleau (*Betula sp.*) pourraient aussi correspondre à des boisements clairs.

Les taux polliniques de résineux (Gymnosperme, *Pinus sp.* dont *Pinus type sylvestris*) apparaissent largement minoritaires (environ 5 à 10%). Au regard des faibles taux, il est possible que ces pollens soient d'origines lointaines.

Quelques pollens d'aulne (*Alnus sp.*) et de peuplier (*Populus sp.*), associés potentiellement aux noisetiers et bouleaux suggèrent l'existence de boisements hygrophiles réduits ou relativement éloignés.

On note une attestation de noyer (*Juglans sp.*) dans le prélèvement n° 26, essence qui pourrait avoir été introduite ou favorisée par les activités humaines.

Les quatre niveaux sont marqués par de fortes proportions de pollens de callune (*Calluna sp.*). En effet, les taux polliniques de cette bruyère représentent entre 20 et 60% des pollens. La bruyère est une plante capable de se développer sur des sols pauvres, souvent dégradés par des activités humaines (ex. défrichements, sols surexploités). On la retrouve le plus souvent dans des milieux ouverts tels que les bois clairs, les lisières forestières et les landes. Au regard des forts taux de pollens de bruyères mais aussi la détection de Fabaceae, Poaceae, polypodes (*Polypodium sp.*, en légère hausse), Asteraceae (notamment *Centaurea nigra-type*), *Campanula sp.*, Lamiaceae et Cistaceae, l'existence de formations de landes dans les environs immédiats est très probable.

Les preuves d'exploitations agricoles des alentours existent avec la détermination de pollens de plantes cultivées : attestations de céréales (*Cerealia-type*) dont le seigle (*Secale type*), mais aussi des attestations de plantes adventices représentant près de 5% des pollens dans le prélèvements n°27 (détection systématique de *Centaurea*, dont *Centaurea nigra-type* et *Centaurea cyanus-type*, Fig. 4) et de plantes rudérales (*Plantago sp.*, *Plantago lanceolata*, Convolvulaceae, Brassicaceae, Chenopodiaceae, Caryophyllaceae, *Artemisia sp.*, Asteraceae (*Cirsium-type*), Cichorioideae (*Crepis-type*), Apiaceae, Ranunculaceae).

De plus, l'association du plantain (*Plantago sp.* dont *Plantago lanceolata*), *Artemisia sp.*, Chenopodiaceae, Poaceae, Asteraceae (*Cirsium-type*) et de Renonculaceae suggère l'existence de végétations de chemins, zones d'habitats, lieux de pacages. L'hypothèse de ces formations rudérales est renforcée par l'observation d'un microfossile non pollinique d'ascomycète de groupe coprophile (HdV-55), indicateur de matières fécales, voire d'élevage (Prélèvement n° 26, Fig. 5). Notons aussi quelques microrestes hyalins HdV-181. Ils pourraient caractériser des zones d'eau stagnantes peu profondes et eutrophes (Cugny, 2011).

Un ensemble pollinique caractéristique des prairies mésophiles à humides peut aussi être suggéré avec les pollens de Poaceae, Cyperaceae, *Campanula sp.*, Asteraceae (dont *Centaurea nigra-type*), *Plantago sp.* (dont *Plantago lanceolata*), Apiaceae, *Calluna sp.*, Ranunculaceae, Fabaceae (dont *Trifolium sp.*), Lamiaceae, Brassicaceae, Juncaceae.

Les végétations de mousses et de fougères sont toujours bien représentées même si les taux de spores monolètes et d'*Asplenium sp.* sont en léger retrait. Ces végétations trouvent probablement des conditions de développement favorables dans les environs immédiats de la cavité. La proportion de polypodes (*Polypodium sp.*) augmente légèrement peut-être en relation avec le développement de landes (cf. ci-dessus).

Enfin, quelques rares occurrences de plantes aquatiques sont à noter avec *Lemna sp.*, *Potamogeton sp.* et *Callitriche sp.*

3.4. Description des phases écologiques

Trois phases écologiques peuvent être définies :

WAL 1 (zone a, b) : phase à Gymnosperme (*Pinus* dont *Pinus sylvestris*), Cichorioïdeae (*Crepis-type*), Poaceae, spore monolète

WAL 2 (zone c, d) : phase à Gymnosperme (*Pinus* dont *Pinus sylvestris*), Cichorioïdeae (*Crepis-type*), Poaceae, *Asplenium*, spore monolète, *Betula*, *Corylus*, Asteraceae (*Cirsium-type*), Cyperaceae, Ranunculaceae

WAL 3 (zone e) : phase à *Calluna*, *Corylus*, *Tilia*, *Quercus*, Poaceae, Cichorioïdeae (*Crepis-type*), Gymnosperme, Asteraceae (*Cirsium-type*), spore monolète, *Asplenium*, (*Cerealia-type* dont *Secale-type*, *Juglans*, *Carpinus*, *Fagus*)

3.5. Description de la courbe du flux pollinique (concentrations polliniques exprimées en nb de grains / mL)

Les concentrations polliniques absolues vont principalement dépendre de trois facteurs :

- la taphonomie des pollens est conditionnée par le développement des micro-organismes du sol (la biodégradation et le phénomène de la respiration exigent des degrés d'oxygénation suffisants), mais aussi des contraintes physico-chimiques du sol (compression, température, humidité),
- la dynamique sédimentaire (vitesse) influant sur les durées de contact entre la pluie pollinique et la surface de déposition,
- la production pollinique dépendant directement du (paléo-) environnement végétal : production pollinique des différentes essences mais aussi proximité vis-à-vis du prélèvement.

En premier lieu, les palynozones WAL1-a et WAL1-b (prélèvements n°1 à n°4), montrent des concentrations polliniques très faibles comprises entre 250 et 550 pollens / mL de sédiment (Fig. 6). La taphonomie (contexte à dominance minéral) mais aussi probablement une sédimentation rapide expliquent probablement ces faibles concentrations. Notons que des datations de ces niveaux permettraient de détailler la vitesse de sédimentation.

Pour les prélèvements des palynozones WAL2-c et WAL2-d (prélèvements n°5 à n°23), les concentrations de pollens sont comprises entre 1900 et 11000 pollens / mL de sédiments. Quelques prélèvements (n°8 et n°18) montrent des concentrations avoisinant les 10000 pollens / mL.

On constate des concentrations polliniques en augmentation par rapport aux niveaux précédents. Les grands traits de la composition pollinique variant « peu » (ce sont globalement les pollens de résineux qui dominent les herbacées), c'est probablement une modification du phénomène de sédimentation (nature du sédiment, vitesse, caractère anaérobie) qui expliquent les changements. Là encore, des informations d'ordre géomorphologique et davantage de datations permettraient de préciser la dynamique sédimentaire (obtention d'un modèle « Age-Profondeur »).

Des concentrations polliniques plus importantes sont constatées pour les prélèvements n° 8 et n° 18 (voire aussi n°16). Ces pics ne semblent être associés à aucun changement majeur du paléo-paysage. Ils pourraient correspondre à des productions polliniques un peu plus importantes en relation avec la proximité de quelques arbres ou bien à un ralentissement de la vitesse de sédimentation.

On constate pour les prélèvements n°24 à 27 (phase écologique WAL3), des concentrations comprises entre 2850 et 10400 pollens / mL. Ces résultats sont donc comparables aux concentrations observées pour la phase WAL2. Pourtant, on observe dans le même temps une modification radicale de la composition pollinique. En effet, les pollens de résineux ont été remplacés par des pollens de feuillus, globalement moins producteurs en quantité de pollens. Les valeurs des concentrations polliniques ont donc été « maintenues » probablement à la fois par des conditions taphonomiques plus favorables (le taux de Cichorioïdées *Crepis-type* est moins important, indiquant des conservations polliniques différentielles moindres), mais peut-être aussi par des vitesses de sédimentation moins rapides et la proximité de certaines essences notamment de bruyères (*Calluna-type*).

Remarque : Les trois datations actuelles sont suffisantes pour attribuer les niveaux de la phase écologique WAL2 au Préboréal, mais insuffisantes pour établir un modèle « Age - profondeur ». En effet, elles ne couvrent qu'une petite partie de la stratigraphie et montrent des inversions (chapitre 5.).

4. INTERPRETATION, SYNTHÈSE DES RESULTATS

- Période du Préboréal, Chronozone IV (WAL2, WAL1 ?)

La phase écologique WAL2 a pu être rattachée au Préboréal de par sa composition pollinique mais aussi grâce à trois datations radiocarbone (Fig. 3). La phase WAL1 correspond probablement aussi à une première partie de cette période climatique. Toutefois, en l'absence de datations absolues, l'hypothèse d'une appartenance à une période climatique antérieure (Dryas récent, Allerød, voire Dryas moyen) ne peut être tout à fait écartée.

- phase écologique WAL1

La phase écologique WAL1 comprend deux zones polliniques « a » et « b ». Elle présente un très mauvais état de conservation général et des conservations différentielles importantes (ex. *Crepis type*), rendant difficile la comparaison avec les compositions des niveaux postérieures. Il n'est pas possible de comparer les résultats en terme de quantité de pollens (ex. sommes des taux de pollens d'arbres et évolution des fréquences polliniques).

En revanche, l'observation des associations polliniques a permis de reconnaître quelques grands traits paléo-paysagers :

Au niveau de la composition pollinique arborescente, des pollens de résineux (dont le pin), de rares occurrences de bouleau et de noisetiers sont observés.

En ce qui concerne les végétations herbacées, ce sont surtout des pollens résistants (*Crepis-type*), de Poacées et de spores monolètes qui ont pu être reconnus.

Cette image très lacunaire montrant des paysages couverts par des résineux, semble correspondre à des paysages encore froids. Toutefois, la détection de quelques attestations de noisetier, essence mésophile, constitue un indice de réchauffement.

Même s'ils sont lacunaires, ces grands traits paléopaysagers semblent assez proches de la description obtenue pour la phase écologique suivante : WAL2 (Préboréal). Cependant, on ne peut tout à fait écarter l'hypothèse d'une correspondance avec des paysages, certes un peu plus ouverts, mais aux boisements qui sont aussi dominés par le pin et le bouleau, du Dryas récent ou de l'Allerød, reconnus par exemple dans les diagrammes d'Echternach (Guiot et al., 1992) ou de Roudbaach (Van Mourik et al., 2017).

En l'absence de datation absolue, l'attribution chronologique de cette phase écologique reste très hypothétique.

- phase écologique WAL2

La phase écologique WAL2 couvre une grande partie de la stratigraphie allant du prélèvement n°5 au n°23.

Trois datations radiocarbone ont été réalisées à proximité immédiate des prélèvements n°17 à n°23 (cf. Fig. 1 et Fig. 2). Compte tenu des marges d'incertitudes, les datations obtenues permettent de cerner une période allant de 9745 à 9195 cal. BC, correspondant au Préboréal (Fig. 3).

La phase écologique WAL2 comprend deux zones polliniques « c » et « d ». Ces deux zones décrivent des paysages boisés. On constate des taux de pollens d'arbres oscillant entre 60 et 90% avec toutefois l'impression d'une légère ouverture du paysage en fin de période (zone d), conséquence possible d'incendies locaux.

Les boisements sont majoritairement constitués de résineux, notamment de pins dont le pin de type sylvestre. Ces pins couvrent probablement la majorité des versants et des plateaux. On observe plus ponctuellement aussi la présence du sapin, potentiellement d'origine lointaine, et du genévrier, probables végétations relictuelles des périodes antérieures plus fraîches. Le bouleau et le noisetier sont détectés de façon ténue mais en continu. La présence de ces feuillus donnent un caractère mésophile à l'ensemble paléopaysager et sous-tendent des températures modérées. Ces essences colonisatrices sont associées à des boisements clairs et de lisières. L'aulne est aussi régulièrement détecté. Il témoigne de boisements hygrophiles probablement en bordure de zones humides ou à l'intérieur de zones alluviales. Quelques pollens de saule, voire de bouleau et de noisetier proviennent vraisemblablement aussi de ces zones humides.

Ces boisements apparaissent cohérents avec les assemblages polliniques obtenus pour le Préboréal dans les diagrammes d'Echternach (Guiot et Cousteaux, 1992), de Roudbaach (Van Mourik *et al.*, 2017), voire aussi de Heffingen-Loschbour (Brou *et al.*, 2015). Seuls les taux de bouleau semblent ici sous-représentés par rapport aux résultats généralement obtenus durant cette période.

Plusieurs niveaux attribués au Préboréal et appartenant à la même coupe stratigraphique ont fait l'objet d'analyses anthracologiques (Pernaud, 2001). Les couches désignées « C21 à C25 » dans l'article, correspondant probablement aux niveaux associés aux prélèvements riches en micro-charbons n°20 à 22 (zone d), montrent des résultats globalement cohérents avec les résultats polliniques. En effet, on constate une majorité de charbons de pin de type sylvestre accompagnés de quelques occurrences de noisetier et de bouleau. Plus surprenant est la détection de fragments d'essences appartenant à la chênaie mixte (chêne, tilleul, orme, érable). Ces taxons sont complètement absents du diagramme pollinique au Préboréal. Il pourrait s'agir soit de paléo-boisements localisées dans des secteurs particulièrement bien exposés et qui n'auraient pas été détectés par la palynologie, soit de fragments ayant percolé depuis des niveaux supérieurs (ex. depuis des couches associées aux prélèvements n°24 à 27, attribuées au Subatlantique, cf. phase écologique WAL3).

La zone « d » se différencie de la zone « c » par des concentrations en micro-charbons très importants dans les prélèvements n°20, 21 et n°22 (Fig. 4). Cette évolution est la conséquence d'incendies d'ampleur probablement assez limitée, car dans le même temps nous ne constatons pas de modifications majeures dans l'évolution de la composition pollinique. Seule une légère baisse du taux de pollens d'arbres est perçue au profit des Poacées (Prélèvement n°20).

Les végétations herbacées sont représentées essentiellement par des pollens de Poacées et de Cichorioïdées (*Crepis* -type). Cependant, compte tenu du caractère plus résistant des enveloppes polliniques des Cichorioïdées, il faut modérer le caractère prépondérant de cette famille de plantes dans le paysage.

L'analyse des associations polliniques permet d'identifier plusieurs formations herbacées, probablement localisées sur le plateau situé en amont de la grotte-diaclose. Des végétaux d'espaces en cours de recolonisation et de friches sont régulièrement détectés (Poacées, Asteracées dont le chardon (*Cirsium*-type) et l'armoise, Cichorioïdées, Chenopodiacées, Caryophyllacées, Brassicacées, la renouée des oiseaux (*Polygonum aviculare*-type), le plantain. Ces végétations peuvent s'apparenter à des formations steppiques dont plusieurs essences sont considérées comme des « rudérales » (ex. Chénopodiacées, plantain et voir aussi la courbe de la somme des plantes rudérales Fig. 4). Des formations apparentées à des « prairies hygro- à mésophiles » peuvent aussi être suggérées (Poacées, Cyperacées, Campanulacées, Rubiacées, Asteracées dont les centaurées (*Centaurea type nigra*), Apiacées, Renonculacées, le trèfle, la renouée des oiseaux (*Polygonum aviculare*-type), les prêles (*Equisetum*) et Juncacées).

De nombreux spores de mousses et de fougères ont aussi été observées. Les quelques types de spores reconnus (genres *Asplenium*, *Polypodium*) correspondent à de petites fougères vivant dans des espaces ombragés et frais. Les environs immédiats autour de la grotte ont pu offrir des conditions de développement favorables à ces fougères.

- Période du Subatlantique, Chronozones IX et X (WAL3)

- phase écologique WAL3

Cette phase écologique est associée aux quatre prélèvements situés au sommet de la série.

La composition pollinique observée est en rupture totale avec la phase écologique précédente, puisque des forêts caducifoliées (chênaie mixte, chênaie-hêtraie), des formations de landes, des végétations rudérales en plus de taxons allochtones (céréale, noyer) ont remplacé les boisements de pins. De plus, la détection à la fois du hêtre et surtout du charme selon Gauthier (2004) s'accordent pour attribuer la phase écologique WAL3 au Subatlantique.

Un hiatus important semble donc s'être produit entre les prélèvements n°23 et n°24.

Le taux de pollens d'arbres oscille autour de 50 %. La mosaïque paysagère semble donc partagée entre zones boisées, probablement localisées sur les versants et zones ouvertes plutôt sur les plateaux.

La chênaie diversifiée (chêne, tilleul, orme, charme) et la chênaie-hêtraie sont désormais les forêts dominantes. Les résineux sont relégués au second plan dans le paysage. Compte tenu de la forte dissémination de ces pollens, ils sont peut-être d'origines lointaines.

Le bouleau et surtout le noisetier occupent des zones de reconquête forestière, de boisements clairs ou de lisières. Ils peuvent aussi provenir de boisements humides en association avec l'aulne et le peuplier.

Les espaces environnants, notamment sur le plateau, semblent avoir été cultivés. La détection de pollens de quelques occurrences de céréales (*Cerealia-type*) dont le seigle (*Secale-type*), accompagnés d'attestations de plantes adventices (*Centaurea*, dont *Centaurea nigra-type* et *Centaurea cyanus-type*) et de plantes rudérales (plantains, Convolvulacées, Brassicacées, Chenopodiacées, Caryophyllacées, l'armoise, Asteracées (*Cirsium-type*), Cichorioidées (*Crepis-type*), Apiacées, Ranunculacées) sont typiques de cultures. Notons que l'association du plantain, de l'armoise, des chénopodiacées suggèrent aussi des végétations de chemins, de zones d'habitats, de lieux de pacages. Cette dernière hypothèse est renforcée par l'observation d'un microfossile non pollinique d'ascomycète de groupe coprophile (Hdv-55) indicateur de matière fécales, voire d'élevage (Prélèvement n°26).

La phase écologique est marquée par d'importants taux de pollens de bruyères de type callune (*Calluna sp.*), notamment au niveau des prélèvements n° 24 et n°25. Ces bruyères, potentiellement associées à des Fabacées, Poacées, polypodes (*Polypodium sp.*), Asteracées (dont *Centaurea cyanus-type*), Campanulacées, Lamiacées, et Cistacées sont typiques de formations de landes. Ces végétations se développent souvent sur des terrains pauvres. Elles sont caractéristiques des premiers stades de la recolonisation végétale d'espaces dégradés, généralement suite à des activités humaines (ex. incendies ou surexploitations agricoles).

Ce développement des landes avait aussi été reconnu dans les diagrammes polliniques des colonnes n°1 et n°2 de la grotte-diaclase (Gaudin, 2019). Les datations des niveaux correspondants avaient alors permis d'attribuer le développement de ces landes aux périodes de l'Age du Fer et de l'Antiquité. C'est au cours de l'Age du Fer que le taux de pollen de bruyère était apparu le plus important dans les diagrammes des colonnes 1 et 2 (Gaudin, 2019). Cela pourrait bien correspondre bien aux prélèvements n°24 et 25 (début du Subatlantique ou chronozone IX).

Enfin, la détection d'un pollen de noyer (prélèvement n°26) pourrait marquer la transition vers le Subatlantique récent (chronozone X). En effet, cette essence, déjà détectée dans le diagramme de la colonne 2 (Gaudin, 2019), semble apparaître à l'époque romaine au Luxembourg (Gauthier, 2000 ; Couteaux, 1970), dans le Nord-Est de la France (Richard, 1999) et dans le Bassin parisien (Leroyer *et al.*, 2011).

5. LISTE DES QUESTIONNEMENTS

1. Une meilleure compréhension de la stratigraphie est indispensable. Une étude sédimentaire (granulométrie, texture, etc...) paraît nécessaire pour avoir des éléments d'interprétation de la dynamique sédimentaire (vitesses), la provenance des sédiments (et des pollens), les phénomènes en jeu (ruissellements, effondrements), les ruptures éventuelles (arrêt de sédimentation ou phénomène érosifs). Le hiatus qui semble exister entre les prélèvements n°23 et n°24 serait à confirmer.
2. Une série de datations réparties le long de la stratigraphie serait intéressante pour la compréhension de la dynamique sédimentaire. L'établissement d'un modèle « Age-Profondeur » (par exemple à l'aide du logiciel développé par le CNRS : CHRONOMODEL (<https://www.iram-at-crp2a.cnrs.fr/spip/spip.php?article228>, cf. Philippe LANOS à Rennes) serait pertinent pour appréhender les vitesses de sédimentation et ainsi mieux interpréter les valeurs de concentrations polliniques constatées (cf. chapitre 3.5).
3. Le relevé stratigraphique (Fig. 2) est une très bonne base. Il faudrait néanmoins s'accorder pour attribuer une nomenclature commune à chaque US. Car plusieurs documents font allusion à différents prélèvements (ex. datations dans les couches « M1 », « M3a », « M3b », « M4 », « M5 ») et différentes couches (ex. couche C21 à C25 dans l'article de J.-M. Pernaud) sans que l'on sache véritablement identifier les US correspondantes.
4. L'article de J.-M. Pernaud fait allusion à 5 couches C21 à C25. Est ce que ces 5 couches correspondraient à des prélèvements effectués par J. Heim (ex. prélèvements « A » à « E ») ?
5. Le hiatus qui semble survenir au-dessus du niveau du prélèvement n°23 empêche l'enregistrement de la transition vers le Boréal, Atlantique, etc... mais il est possible que des US situées légèrement sur la gauche de la stratigraphie aient enregistré ces périodes. Il pourrait être pertinent de faire des tests ou/et des datations dans les US situées légèrement sur la gauche, pour voir s'il est possible de « contourner » le hiatus et ainsi obtenir une chronologie de l'évolution du paysage en continu.
6. La comparaison avec le diagramme pollinique obtenu par J. Heim montre des résultats assez semblables (cf. Fig. 10). On note néanmoins un « pic » de pollens de noisetier (*Corylus*) au niveau du prélèvement « G », ressaut non perçu dans l'étude ci-présente (cf. prélèvement n°24). L'augmentation de la fréquence du noisetier dans cette partie du graphique n'est pas à négliger, car elle pourrait signer la transition vers le Boréal. La question serait donc d'affiner l'étude de cette partie (entre les prélèvements n°23 et n°24) afin de savoir si le pic de noisetier perçu par Heim peut être attribué au Boréal, auquel cas nous aurions affaire à un prélèvement (G) appartenant à une US différente du prélèvement 24, ou bien au développement du noisetier associé au Subatlantique que nous avons bien perçu, mais dans des proportions plus modérées (cf. proportion du prélèvement n°24).
7. Les résultats sont apparus très lacunaire pour les prélèvements situés en bas de la série (phase écologique WAL1). La composition pollinique de ces niveaux est probablement à rattacher au Préboréal mais il subsiste un doute (cf. chapitre 4.). Une datation absolue (C14?) de ces niveaux pourrait permettre d'avoir un repère chronologique pour ces premiers pollens.

6. BIBLIOGRAPHIE

BARBIER D., 1999 - *Histoire de la végétation du nord-mayennais de la fin du Weischelien à l'aube du XXIème siècle Mise en évidence d'un Tardiglaciaire armoricain Interactions Homme-Milieu*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, Editions Groupe d'Etude des Milieux Naturels, Nantes, tome I, texte : 284 p., tome II, illustration : 63 Figures.

BEUG H.-J., 2004 - *Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete*. Publisher Verlag Friedrich Pfeil, Munich, 542 p.

BEHRE K.E., 1981 - *The interpretation of anthropogenic indicator in pollen diagrams*. Pollen et spores, vol. XXIII, n°2, p. 225-245.

BROU L, COURT-PICON M., DABKOWSKI J., NATON H.-G. 2015. Le gisement mesolithique d'Heffingen-Loschbour (G.-D. de Luxembourg) - Bilan des études paleoenvironnementales depuis 2003. *Bulletin de la Société préhistoire luxembourgeoise*. 36-37, 69-96.

CHESTER P.I. & IAN RAINE J., 2001 - Pollen and spore keys for Quaternary deposits in the northern Pindos Mountains, *Grana*, 40, Greece, p. 299-387.

COUTEAUX M., 1970 - Etude palynologique des dépôts quaternaires de la Vallée de la Sûre à Echternach et à Berdorf et de la Moselle à Metert. *Archeological Institute of Grand-Duchy of Luxembourg*, 34, p. 297-336.

CUGNY C., 2011 - Apport des microfossiles non-polliniques à l'histoire du pastoralisme sur le versant nord pyrénéen. Entre référentiels actuels et reconstitution du passé. Thèse de doctorat, Université Toulouse 2 Le Mirail, 2 vol., 373 p.

FAEGRI K. et IVERSEN J., 1989 - *Textbook of pollen analysis 4th ed*. John Wiley & Sons, Chichester, 328 p.

GAUDIN L., 2004 - *Les transformations spatio-temporelles de la végétation du nord-ouest de la France depuis la fin de la dernière glaciation. Reconstitutions paléo-paysagères*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2 tomes, 768 p.

GAUDIN L., 2019 - Analyse palynologique de la grotte diaclase de la « Karelslé » (Waldbillig). Reprise et interprétation des observations effectuées par J. Heim en 1992. *Bulletin du centre national de recherche archéologique*, 2019-5, 20-53.

GAUDIN L., 2020 - Tests palynologiques réalisés sur cinq prélèvements de la grotte diaclase de la « Karelslé » à Waldbillig (Luxembourg). 19p. (Destinataire public : CNRA, Service d'archéologie préhistorique. R.O. L. Brou., F. Le Brun-Ricalens).

GAUTHIER E. 2000 - *Analyse pollinique des remplissages sédimentaires des mardelles de Hellange et de Mersch (Luxembourg)*. Rapport du Laboratoire de Chrono-Ecologie UMR 6565, Besançon. 19 p.

GRIMM E.C., 1987 - CONISS : a FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences*, Vol. 13, no.1, p 13-35.

- GAUTHIER E., 2000 - *Analyse pollinique des remplissages sédimentaires des mardelles de Hellange et de Mersch (Luxembourg)*. Besançon. 19p.
- GAUTHIER E., 2004. - *Forêts et agriculteurs du Jura. Les quatre derniers millénaires*. Besançon : Presses Universitaires de Franche-Comté, 197 p. (Annales Littéraires de l'Université de Franche-Comté ; 765, série "Environnement, sociétés et archéologie ; 6).
- GUIOT J., COUTEAUX M. 1992. Quantitative climate reconstruction from pollen data in the Grand Duchy of Luxembourg since 15000 yr BP. *Journal of Quaternary Science*, 7, 303-309.
- HEIM J., 1970 - *Les relations entre les spectres polliniques récents et la végétation actuelle en Europe occidentale*. Thèse, Université de Louvain, Laboratoire de Palynologie et Phytosociologie, 181 p.
- LOPEZ SAEZ J.-A., LOPEZ GARCIA P. et BURJACHS F., 2003 – *Arqueopalinologia : sintesis critica*. *Polen* 12, p. 5-35.
- LEROYER C., COUBRAY S., ALLENET G., PERRIERE J., PERNAUD J.-M., 2011 – *Vegetation dynamics, human impact and exploitation patterns in the Paris basin through the Holocene: Palynology vs. Anthracology*. 5th International Meeting of Charcoal Analysis "The charcoal as cultural and biological heritage" Valencia (Spain). Volume: *Sagvntvm extra* 11: p. 81-82
- OUGUERRAM A., 2002 – *Histoire de la vallée de l'Erdre (affluent de la Loire, Massif armoricain, France) de la fin du Tardiglaciaire aux époques actuelles*. Thèse de doctorat, Université de Moulay Ismaïl de Meknès (Maroc), Editions Groupe d'Etude des Milieux Naturels, 121 p., 24 Figures.
- PERNAUD J.-M. 2001. Postglacial vegetation history in Luxembourg: new charcoal data from the cave of la Karelslé (Waldbilig, eastern Gutland). *Vegetation History and Archaeobotany*, 10, 219-225.
- PLANCHAIS N., 1971 – *Histoire de la végétation post-würmienne des plaines du bassin de la Loire, d'après l'analyse pollinique*. Thèse d'Etat , Montpellier, 2 vol., 115p.
- PUERTAS O., 1997 – *Évolution de la végétation depuis le Dryas récent dans la plaine littorale de Montpellier (Hérault, France) à partir de l'analyse pollinique. Dynamique naturelle et anthropisation du milieu*. Thèse de doctorat, université de Franche-Comté, 337p.
- RAMEAU J.C., MANSION D. et DUME G., 1989 - *Flore forestière française, guide écologique illustré*. T.1, plaines et collines, Institut pour le développement forestier, Paris, 1785 pages.
- RICHARD H., 1999 – *La palynologie*. In BROCHIER J.E., BOURQUIN-MIGNOT C., CHABAL L., CROZAT S., FABRE L., GUIBAL F., MARINVAL P., RICHARD H., TERRAL J.-F., THERY I. (éds.), *Errance* (Collection "Archéologiques"). La Botanique, Paris, 207 p.
- REILLE M., 1990 – *Leçon de palynologie et d'analyse pollinique*. CNRS, Paris, 206 pages.
- REILLE M., 1992 - *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord.*, Editions Louis-Jean, Gap, 520 p.
- STOCKMARR J., 1972 – *Tablets with spores used in absolute pollen analysis. Pollens et spores*, 13, p. 615-621.

VAN GEEL B., APTROOT A., 2006 – Fossil Ascomycetes in Quaternary deposits. *Nov Hedw*, 82, p. 313-329.

VAN MOURIK J. M., BRAEKMANS D. J. G., DOORENBOSCH M., KUIJPER W. J., VAN DER PLICHT J. 2016. *Natural versus anthropogenic genesis of mardels (closed depressions) on the Gutland plateau (Luxembourg)*. *SOIL Discussions*, 2015-82, 44 p.

VAN MOURIK J. M., SLOTBOOM R.T. 2017. Palynological reconstruction of the effects of Holocene climatic oscillations and agricultural history on soils and landforms in Luxembourg. In Kooijman et al. 2017. *The Luxembourgish Gutland Landscape*. Springer Verlag. 39-72.

VISSET L. 1974 – Le tumulus de Dissignac à Saint-Nazaire (Loire-Atlantique), étude palynologique. *Bulletin de la Société scientifique de Bretagne*, 48, p. 7-14.

7. ANNEXE

7.1. Détail du protocole d'extraction utilisé :

Afin d'isoler et de concentrer les grains de pollen, le protocole utilisé au sein de l'UMR EPOC comporte les étapes suivantes :

Préparation du sédiment

1- Le sédiment (environ 5g) est séché à l'étuve à 40°C pendant une nuit ou plus, suivant la teneur en eau.

Estimation du volume de sédiment

2- Dans une éprouvette de 25cc en polypropylène, mettre 15cc d'eau distillée. Poser celle-ci sur une balance, faire la tare, puis ajouter le sédiment. La colonne d'eau augmente, enregistrer le poids ainsi que le volume.

Lavage du sédiment

Ce lavage permet de travailler sur deux proxies. La fraction supérieure est récupérée pour, en particulier, l'étude des foraminifères, et la fraction inférieure pour l'étude des pollens et dinoflagellés.

3- Prendre un tamis de maille 150µm et de diamètre 10cm, le poser sur un bécher de 1000ml. Vider le contenu de l'éprouvette sur le tamis, et laver délicatement à l'eau du robinet. Lorsque le résidu > à 150µm est propre, bien le rincer à l'eau distillée et le récupérer dans une coupelle toujours avec de l'eau distillée. La fraction inférieure récupérée dans le bécher est mise à décanter pendant 48h minimum. Ne pas oublier de couvrir les bécher pour éviter toute pollution.

Attaque à l'acide chlorhydrique (HCl)

Cette attaque permet d'éliminer tous les organismes et particules calcaires.

4- Aspirer l'eau à l'aide d'une trompe à vide. Celle-ci est équipée, à l'extrémité du tuyau, d'un embout en plastique présentant un angle de 90° par rapport à la paroi du bécher. Cet embout permet d'éviter toute aspiration accidentelle du résidu décanté au fond du bécher. Récupérer le résidu dans un tube de 100ml à fond rond en polypropylène.

5- Centrifuger 7mn à 2500tr/mn. Eliminer l'eau, remettre en suspension avec l'agitateur. Mettre une ou deux pastilles de Lycopodes dans le tube, le nombre de pastilles étant défini en fonction de la concentration supposée en pollen ou en dinoflagellés. Elles permettent d'estimer les concentrations en palynomorphes.

6- L'attaque à l'HCl à **froid** se fait en trois étapes. Une première attaque à **10%**, remuer à l'aide d'une baguette d'agitation en verre, laisser agir quelques minutes, si le sédiment est riche en carbonates il est important de commencer par l'HCl à faible concentration afin d'éviter une importante effervescence et également un débordement des tubes. Continuer par de l'HCl à **25%** attendre quelques minutes et terminer par de l'HCl à **50%**. Cette dernière attaque est essentielle pour la suite de la manipulation. Bien s'assurer que la réaction est terminée en ajoutant de l'HCl à 50%. Lorsqu'il n'y a plus d'effervescence dans le tube, la réaction est terminée.

Attaque à l'acide fluorhydrique (HF)

Cette attaque permet d'éliminer la silice et les silicates.

7- Centrifuger les tubes de 100ml pendant 7mn à 2500tr/mn et éliminer le surnageant. Remettre le culot en suspension avec l'agitateur, puis mettre environ 40 à 50cc d'HF à **45% à froid**. Fermer les tubes avec le bouchon approprié et les poser sur le secoueur, laisser agiter pendant 4 à 5h. Bien respecter la concentration de l'HF, car une concentration supérieure peut entraîner une forte effervescence, avec risque de perte de sédiment.

8- Centrifuger à nouveau les tubes, 7mn à 2500tr/mn, éliminer le surnageant. Remettre en suspension avec l'agitateur, puis mettre environ 40 à 50cc d'HF à **70% à froid**. Poser les tubes sur le secoueur, laisser agiter pendant **28 à 30h**.

Note : Attention pour faire cette manipulation il est impératif de respecter les mesures de sécurité, mettre des longs gants, ainsi que des lunettes. Travailler toujours sous hotte aspirante bien fermée. Travailler également les tubes toujours fermés.

Deuxième attaque à l'acide chlorhydrique (HCl)

Elimination des fluorosilicates.

9- Centrifuger les tubes, 7mn à 2500tr/mn, éliminer le surnageant. Remettre en suspension avec l'agitateur, puis mettre environ 40 à 50cc d'HCl à **25% à froid**. Poser les tubes sur le secoueur, laisser agiter pendant 15mn.

Note : Il est très important de faire cette attaque à l'HCl avant de rincer à l'eau distillée. Des risques de formation de fluorures peuvent avoir lieu et donc gêner le reste de la manipulation.

Rinçage

10- Centrifuger les tubes, 7mn à 2500tr/mn, éliminer le surnageant. Remettre en suspension le culot avec l'agitateur, remplir les tubes d'eau distillée. Centrifuger les tubes, 7mn à 2500tr/mn. Eliminer l'eau, les résidus sont prêts pour la filtration.

Filtration

Cette opération nécessite la mise en œuvre d'un système de filtration. Ce matériel est posé sur une fiole à vide de 2l reliée à une trompe à vide.

11- Remettre en suspension le culot avec l'agitateur et verser une partie ou la totalité du résidu, suivant la concentration, sur le filtre en nylon de maille 10µm. Rincer à l'eau distillée avec une pissette de 50ml. La contenance de la pissette est essentielle car elle permet de l'avoir bien en main et donc de presser suffisamment fort pour avoir un jet assez puissant pour la filtration. Lorsque cela colmate, mettre 20 à 40s d'ultrasons et rincer abondamment, en même temps, avec la pissette. Le succès de cette opération est basé sur la coordination entre les ultrasons et la pissette. Il est important de bien gérer le temps des ultrasons, car l'abus peut casser les microorganismes.

12- Récupérer le résidu, une fois bien lavé, avec la pissette dans un tube à fond conique de 50ml en polypropylène. Bien froisser le filtre entre les doigts pour décoller éventuellement les micro-organismes qui pourraient rester sur le filtre.

13- Centrifuger les tubes, 7mn à 2500tr/mn, éliminer le surnageant à l'aide de la trompe à vide munie de l'embout à 90°. Transvaser le résidu avec de l'eau distillée dans un tube à fond conique de 8cc en plastique. Centrifuger les tubes, 7mn à 2500tr/mn, éliminer le surnageant toujours avec la trompe à vide. Le résidu est prêt pour le montage.

Montage

Montage à la glycérine bidistillée phénolée (lames mobiles)

Cette technique de montage est utilisée pour l'étude des grains de pollen.

14b- Poser une lame sur la plaque chauffante (T° 200°C-250°C), mettre sur celle-ci une goutte de glycérol (*voir annexes*), ajouter quelques gouttes de résidus, doser suivant la concentration voulue. Laisser évaporer l'eau. Pendant ce temps préparer la lamelle en posant sur les longueurs de la lamelle de l'histolaque. Une fois l'évaporation terminée poser la lamelle sur la lame. Retirer la lame de la plaque chauffante et luter les deux côtés restants.

Conservation

15- Pour la conservation remplir les tubes de 8cc d'eau distillée, puis ajouter quelques gouttes de glycérine bidistillée phénolée

Annexes

- Fournisseur des pastilles de lycopodes

Lund University
Department of Geology
Quaternary Sciences
Sölvegatan 12
SE-223 62 Lund
Sweden
Fax : 46-46-2224830

- Fournisseur des filtres de 10µm

Saulas et Cie
5, rue des epinettes
BP 20

10160 Paisy cosdon
fax : 03 25 40 74 87

- Préparation de la gélatine glycinée

Mettre dans un bécher 10g de gélatine plus 34,2cc d'eau distillée. Laisser reposer pendant 2h à froid sans agitation. Ensuite, ajouter 51cc de glycérol à 98% plus 1g de phénol. Chauffer jusqu'à complète dissolution. La solution se solidifie à froid. Lors du montage mettre le bécher sur la plaque chauffante.

- Préparation du glycérol bidistillé phénolé pour la conservation

Mettre dans 1l de glycérol à 98% 1% de phénol.

7.2. Description des échantillons avant traitement

Site	N° prélèvements	Masses envoyées	RQ/ description
Karelslé, Walbillig (Lux)	27	60	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	26	46	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	25	49	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	24	62	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	23	72	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	22	37	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	21	49	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	20	67	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	19	43	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	18	50	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	17	51	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	16	79	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	15	60	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	14	41	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	13	45	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	12	65	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	11	31	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	10	30	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	9	49	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	8	59	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	7	38	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	6	32	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	5	30	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	4	33	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	3	19	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	2	41	Couche à dominance minérale
Karelslé, Walbillig (Lux)	1	16	Couche à dominance minérale

Figure 7. Description des prélèvements avant extraction pollinique

SERIE N°	Nom du demandeur	TECH	Date	Coul (N,B,R,V)	Sol Exotique (lycopodes...)	Nombre grains	Num (1-8)	NOM DE LA CAROTTE	TRONCON	Prof top	Prof base	VOL
2459	GAUDIN	MG	30/11/20	V	lycopodes	18407	1	KARELSLE	1			2
2459	GAUDIN	MG	30/11/20	V	lycopodes	18407	2	KARELSLE	2			2,5
2459	GAUDIN	MG	30/11/20	V	lycopodes	18407	3	KARELSLE	3			1,5
2459	GAUDIN	MG	30/11/20	V	lycopodes	18407	4	KARELSLE	4			2
2459	GAUDIN	MG	30/11/20	V	lycopodes	18407	5	KARELSLE	5			2,5
2459	GAUDIN	MG	30/11/20	V	lycopodes	18407	6	KARELSLE	6			2
2459	GAUDIN	MG	30/11/20	V	lycopodes	18407	7	KARELSLE	7			2
2459	GAUDIN	MG	30/11/20	V	lycopodes	18407	8	KARELSLE	8			2,5
2460	GAUDIN	MG	30/11/20	r	lycopodes	18407	1	KARELSLE	10			2,5
2460	GAUDIN	MG	30/11/20	r	lycopodes	18407	1	KARELSLE	11			1,5
2460	GAUDIN	MG	30/11/20	r	lycopodes	18407	1	KARELSLE	12			3
2460	GAUDIN	MG	30/11/20	r	lycopodes	18407	1	KARELSLE	13			2,5
2460	GAUDIN	MG	30/11/20	r	lycopodes	18407	1	KARELSLE	14			2,5
2460	GAUDIN	MG	30/11/20	r	lycopodes	18407	1	KARELSLE	16			2,5
2460	GAUDIN	MG	30/11/20	r	lycopodes	18407	1	KARELSLE	17			3
2460	GAUDIN	MG	30/11/20	r	lycopodes	18407	1	KARELSLE	19			4
2463	GAUDIN	MG	7/12/20	N	lycopodes	18407	1	KARELSLE	20			3
2463	GAUDIN	MG	7/12/20	N	lycopodes	18407	2	KARELSLE	22			3
2463	GAUDIN	MG	7/12/20	N	lycopodes	18407	3	KARELSLE	23			3
2463	GAUDIN	MG	7/12/20	N	lycopodes	18407	4	KARELSLE	24			4
2463	GAUDIN	MG	7/12/20	N	lycopodes	18407	5	KARELSLE	25			3,5
2463	GAUDIN	MG	7/12/20	N	lycopodes	18407	6	KARELSLE	27			3,5
2394	GAUDIN	MG	17/12/2019	V	lycopodes	20848	A	RELBLÉ LUX F	9			4
2394	GAUDIN	MG	17/12/2019	V	lycopodes	20848	B	RELBLÉ LUX F	15			4,5
2394	GAUDIN	MG	17/12/2019	V	lycopodes	20848	C	RELBLÉ LUX F	18			4
2394	GAUDIN	MG	17/12/2019	V	lycopodes	20848	D	RELBLÉ LUX F	21			4
2394	GAUDIN	MG	17/12/2019	V	lycopodes	20848	E	RELBLÉ LUX F	26			4

Figure 8. Description des traitements réalisés (UMR EPOC)

7.4. Etude pollinique réalisée par J. Heim en 1998

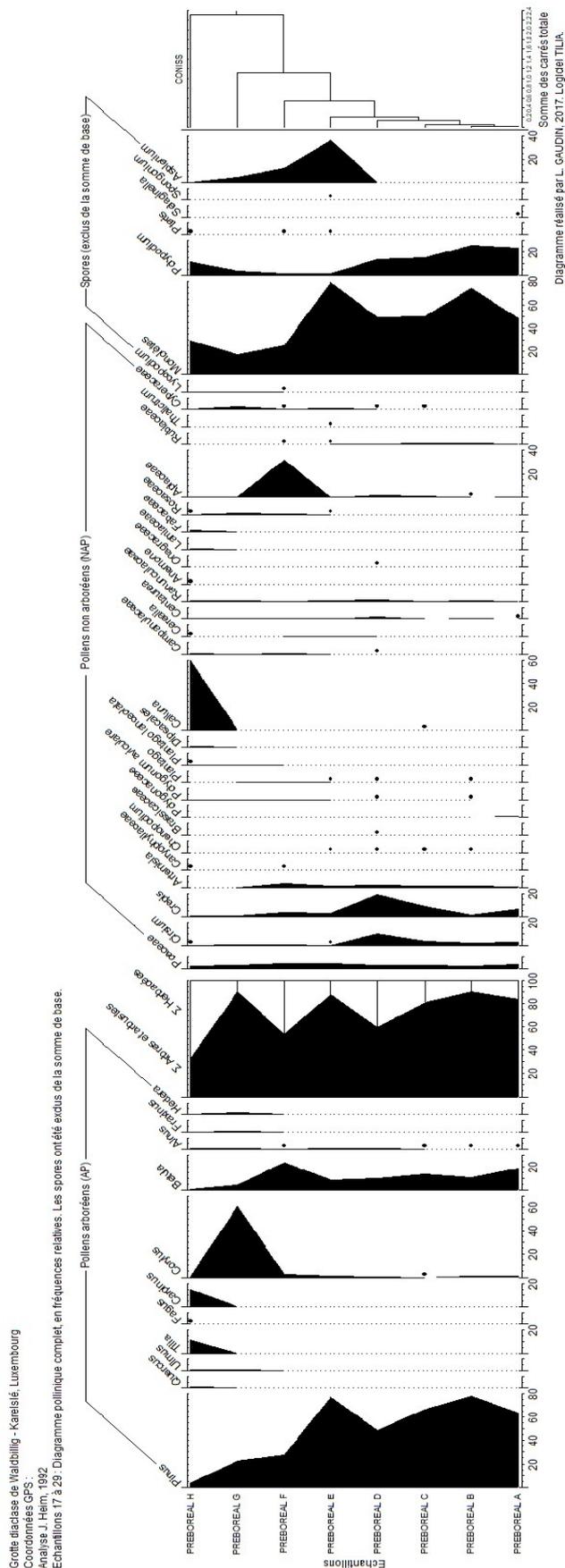


Figure 10. Diagramme pollinique issu des analyses de J. Heim (1998). Diagramme pollinique complet en fréquences relatives. Les spores ont été exclus de la somme de base. La désignation des prélèvements correspond aux lettres utilisées dans le relevé stratigraphique (Fig. 2). Diagramme réalisé à l'aide du logiciel TILIA (v. 2.6.1, Licence ArkéoMap).

7.5. Photographies

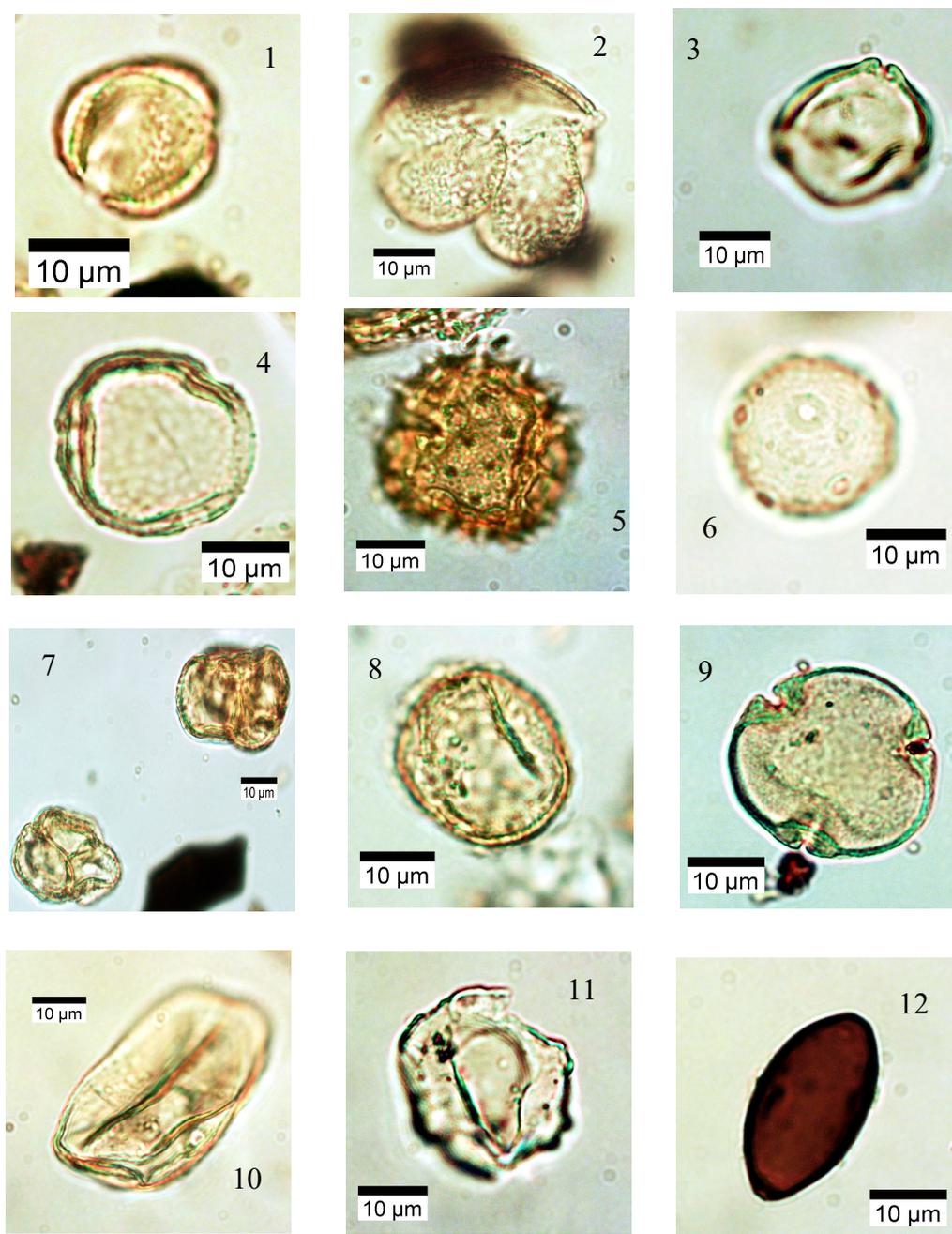


Figure 11. Photographies sous microscope optique à immersion, grossissement x1000. Les échelles représentent des micromètres. 1. Plv n°14 – *Artemisia* sp. ; 2. Plv n°6 – *Pinus sylvestris* type ; 3. – Plv n°1 – *Betula* sp. ; 4. Plv n°19 – *Campanula* sp. ; 5. Plv n°18 - *Valeriana* sp.; 6. Plv n°26 – *Plantago* sp. ; 7. Plv n°24 – *Calluna* sp. ; 8. Plv n°24 – *Quercus* sp.; 9. Plv n°24 – *Tilia* sp. ; 10. Plv n°10 – *Secale* type ; 11. Plv n° 26 – *Juglans* sp.; 12. Plv n° 26 – Ascospore groupe coprophiles – Type HdV-55 - Sordariales.