

LE HINKELSMOAR (EIFEL OCCIDENTAL) : APPLICATION D'ANALYSES MULTIVARIEES AUX DONNEES POLLINIQUES DE B. BASTIN

Colette CORNET¹

RESUME. L'interprétation pollinique établie par Bastin (1980) sur les sédiments du Hinkelsmaar (Eifel, Allemagne) a suscité dans le passé de nombreuses controverses paléocologiques et chronostratigraphiques. Par un traitement statistique (analyses multivariées) nous proposons ici une nouvelle interprétation qui se rapproche de celle de Straka (1985). Par ailleurs, le Dryas moyen et l'oscillation froide de Piottino (Préboréal) n'y sont pas retrouvés, et l'extension marquée d'*Isoetes echinospora* observée à certains moments de la chronologie du maar n'indique pas, contrairement à l'hypothèse de Bastin, une détérioration climatique.

MOTS-CLES: pollens, Tardiglaciaire, oscillation de Piottino, analyse en composantes principales, classification hiérarchique.

ABSTRACT. The pollen diagram's interpretation from the Hinkelsmaar sediments (Eifel-Germany) proposed by Bastin (1980) gave rise to many debating points regarding chronostratigraphy and palaeoecology. Multivariate analyses provide a new interpretation more similar to Straka's (1985). Moreover, the Hinkelsmaar sequence does not reveal the Older Dryas (Late Weichselian) and Piottino (Preboreal) cold oscillations. The marked development of *Isoetes echinospora* at certain times in the lake does not indicate climatic deterioration.

KEYWORDS: pollen, Late-Glacial, Piottino oscillation, principal component analysis, cluster analysis.

1. INTRODUCTION

Situé à 2 km à l'Ouest de Manderscheid (figure 1), dans l'Eifel occidentale (Allemagne), le Hinkelsmaar est une ancienne cuvette lacustre qui fait partie du complexe volcanique quaternaire du Mosenberg-Meerfelder Maar.

Ce site a fait l'objet de recherches palynologiques et téphrochronologiques qui dans le cadre des études régionales tendent à préciser la stratigraphie et la paléoclimatologie du Quaternaire.

Le diagramme pollinique obtenu par Bastin au Hinkelsmaar a suscité trois interprétations particulières : celles de Bastin (1980, 1982), de Slotboom (1982) et de Straka (1985). Ceci illustre bien les difficultés d'interprétation qui peuvent exister dans le cadre des études palynologiques.

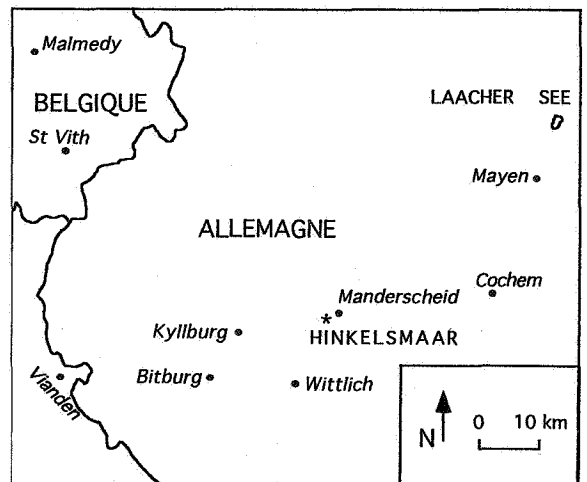


Figure 1. Localisation du Hinkelsmaar (Eifel occidentale, Allemagne).

¹ Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Département de Géologie, Rue de Bruxelles 61 - B-5000 Namur.

1.1. INTERPRETATION DE BASTIN

Pour le diagramme pollinique du sondage Hinkelsmaar IV (figure 2), Bastin (1980) a calculé les pourcentages sur la somme totale des pollens et spores des plantes vasculaires sans exclure les aquatiques. La séquence pollinique résultante couvre de manière ininterrompue le début du Tardiglaciaire avec ses cinq phases classiques (Dryas ancien - Bølling - Dryas moyen - Allerød - Dryas récent) jusqu'au début du Boréal. Une modification climatique rapportée à l'oscillation de Piottino a en outre été mise en évidence au sein du Préboréal. La palynologie du tuf volcanique, localisé entre 456 et 449,5 cm, témoigne «d'une phase de nette péjoration climatique» (Bastin, 1980) datée du Dryas récent par cet auteur. Cependant, la téphrochronologie a rattaché ces cendres au Laacher See Tuff 5 (L.S.T. 5) final selon Juvigné (1980), dont le dépôt aurait eu lieu vers la fin de l'Allerød, entre $10\,950 \pm 190$ B.P. (âge du L.S.T. 5) et $10\,775$ B.P. (fin de l'Allerød). Ce désaccord (figure 3) entre la datation téphrochronologique du tuf (fin de l'Allerød) et l'interprétation palynologique (Dryas récent) s'expliquerait, selon Bastin (1980), par la percolation des pollens et des spores dans la texture sableuse du tuf volcanique.

L'horizon tourbeux surmontant le tuf volcanique serait quant à lui d'âge Préboréal. Or l'échantillon Lv 1132 prélevé entre 449,5 et 441 cm de profondeur a fourni la datation ^{14}C de $10\,540 \pm 90$ B.P., ce qui le situe dès lors dans le Dryas récent. Par rapport au début du Préboréal en Europe occidentale, c.-à-d. environ $10\,250$ B.P., date admise dans la littérature (Straka, 1961), Bastin propose deux réponses à cet écart de temps : soit la datation de l'échantillon Lv 1132 est de quelque 300 ans plus ancienne (Bastin, 1980), soit elle témoigne d'un diachronisme du début de la biozone Préboréal, plus précoce dans l'Eifel que dans le Nord de l'Europe (communication orale de Bastin). Néanmoins, cette datation de Lv 1132 est en accord avec celle de $10\,580 \pm 170$ B.P. obtenu sur l'échantillon KI-306.01, issu de l'horizon de gyttja immédiatement sus-jacent au tuf volcanique sableux dans une autre carotte de sondage (Erlenkeuser & Willkomm, 1971). De 413 à 410,5 cm de profondeur, la phase de péjoration climatique enregistrée par «la forte régression des arbres (19,2%) et la très forte extension d'*Isoetes* (64,3%)», correspond à l'oscillation froide de Piottino au sein du Préboréal. L'échantillon de tourbe Lv 1131 prélevé immédiatement au-dessus, de 411 à 403 cm de profondeur, a obtenu une datation au ^{14}C de $9\,910 \pm 70$ B.P. Rappelons que depuis sa découverte par Zoller en 1960, l'oscillation de Piottino reste l'objet d'une controverse explicitée par Bastin (1980).

1.2. INTERPRETATIONS DE SLOTBOOM ET DE STRAKA

Cette dernière interprétation de Bastin a été critiquée par Slotboom en 1982. Cet auteur attribue un âge Allerød aux sédiments de 488 à 428 cm de profondeur (figure 3). Quant à l'oscillation de Piottino, il l'attribue au Dryas récent. Dans ce cas, les datations ^{14}C seraient toutes deux trop jeunes.

Suivant Straka (1958, 1960, 1961, 1975, 1985), le niveau de cendres volcaniques («Tuffstaub») est bien d'âge Allerød mais il l'attribue à une éruption du Meerfelder Maar et non du Laacher See. Bien au-dessus de ce niveau repère, le même auteur place la limite Dryas récent/Préboréal à la séparation «Feindetritusgyttja/Grobdetritusgyttja». Cette dernière est équivalente à la limite «gyttja/tourbe» de la fin de l'oscillation de Piottino chez Bastin. L'interprétation de Straka (figure 3) est en accord avec les datations ^{14}C .

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. MATERIEL

Les analyses multivariées ont été effectuées sur les comptages de Bastin. Les taxons insuffisamment représentés (moins de 10 individus pour l'ensemble des 47 niveaux) n'ont pas été retenus. La matrice qui en résulte comprend ainsi les 47 échantillons décrits par 33 pollens et spores qui couvrent également les plantes aquatiques (Cornet, 1986).

Or les palynologues n'incluent souvent pas les plantes aquatiques dans la somme (A.P. + N.A.P.), ceci afin d'éviter l'influence trop forte d'un environnement local (Birks & Birks, 1980, p. 167 ; Straka, 1985, p. 205). Au Hinkelsmaar, il s'est avéré que la contribution des plantes aquatiques varie de manière importante (de 0 à 75,8 %). Dans le but d'évaluer leur influence, nous avons entrepris un second traitement statistique basé sur les comptages dont ont été soustraits les cinq taxons aquatiques *Batrachium*, *Isoetes*, *Potamogeton*, *Sparganium*, *Menyanthes* ainsi que la plante *Equisetum* liée aux milieux inondés (Woillard, 1975).

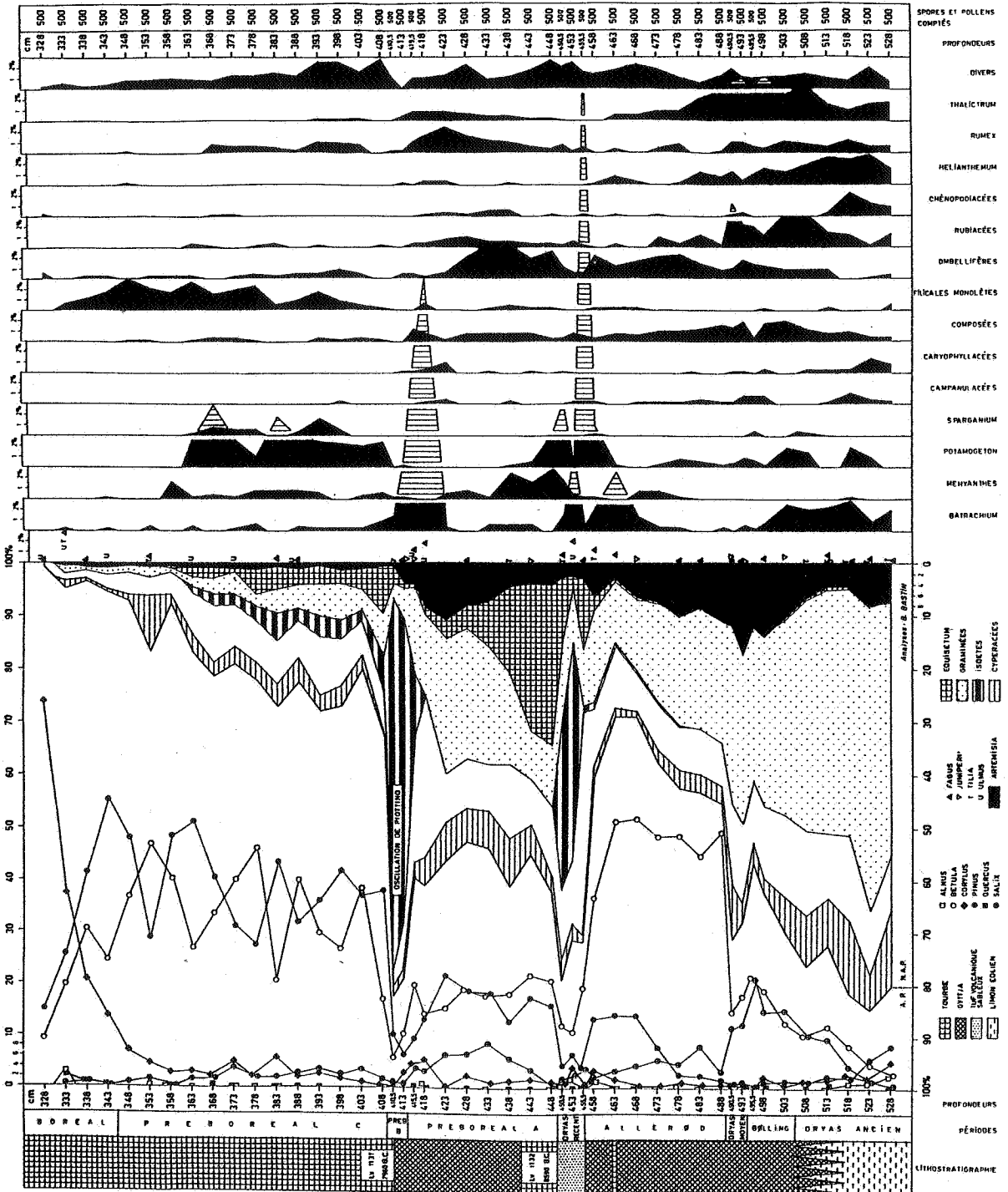


Figure 2. Diagramme pollinique d'une partie du sondage IV réalisé dans le Hinkelsmaar (Bastin, 1980).

2.2. ANALYSES MULTIVARIEES

Notre choix s'est porté sur l'utilisation complémentaire de l'analyse en composantes principales et d'une classification hiérarchique (Cornet, 1986). Cette approche est particulièrement bien adaptée à l'étude d'un

continuum d'échantillons se succédant le long d'un gradient écologique (Depiereux *et al.*, 1983 ; Leclercq & Depiereux, 1987), ainsi que pour la détermination d'«assemblages-zones» dans les carottes de sondage géologique (Cornet *et al.*, 1983).

2.2.1. Transformation des données

Avant d'appliquer des techniques d'analyse multivariée qui utilisent des coefficients de distance ou de corrélation, une transformation des données doit être envisagée dans le but de rendre, pour chaque taxon, la variance indépendante de la moyenne (Dagnelie, 1975). La transformation logarithmique $x' = \ln(x + 1)$ a été ici appliquée (Depiereux *et al.*, 1983). Le «+1» se justifie par la présence des valeurs nulles dans le tableau de comptages.

La standardisation selon les taxons ou les échantillons a été également réalisée car, lorsqu'on applique une technique d'analyse multivariée à un tableau de comptages bruts ou transformés, le poids de chaque ligne et de chaque colonne du tableau est lié à son importance quantitative (Noy-Meyer, 1973).

2.2.2. Choix de la méthode de l'analyse factorielle

L'analyse en composantes principales (ACP) a été entreprise à partir de la matrice de corrélation entre taxons, calculée sur les données transformées. L'analyse factorielle des correspondances (AFC) a fourni des résultats tout-à-fait comparables à ceux de l'analyse en composantes principales. Cette méthode n'a pourtant pas été retenue (bien qu'elle présente l'avantage d'offrir une représentation simultanée des descripteurs et des échantillons sur le même graphique) car, d'une part, nous n'avons pas un tableau de contingence et, d'autre part, la visualisation de la distance du khi carré n'est pas aussi aisée que celle des coefficients de corrélation utilisés dans l'analyse en composantes principales.

Les représentations obtenues par l'ACP et l'AFC donnent l'image d'un nuage de points en forme de croissant. Cet «effet Guttman» se produit lorsqu'il existe, dans les données, «un phénomène fondamentalement unidimensionnel» (Benzecri, 1982), c'est-à-dire que les éléments du nuage de points s'inscrivent dans un référentiel d'axes principaux linéairement indépendants mais liés entre eux par des fonctions polynomiales. En outre, un des objectifs de l'analyse «corrégée» des correspondances (DCA pour «detrended correspondence analysis») est d'éliminer cet effet Guttman (Hill & Gauch, 1980). Curieusement, la DCA a fourni ici des graphiques très peu différents de ceux de l'AFC (non corrigée).

2.2.3. Classification hiérarchique

La technique de classification que nous avons appliquée au tableau est une méthode de fusion hiérarchique. Elle consiste à calculer la distance euclidienne entre les paires d'échantillons dont les données ont été transformées et standardisées. Les groupes sont formés par la méthode de Ward : sont réunis les échan-

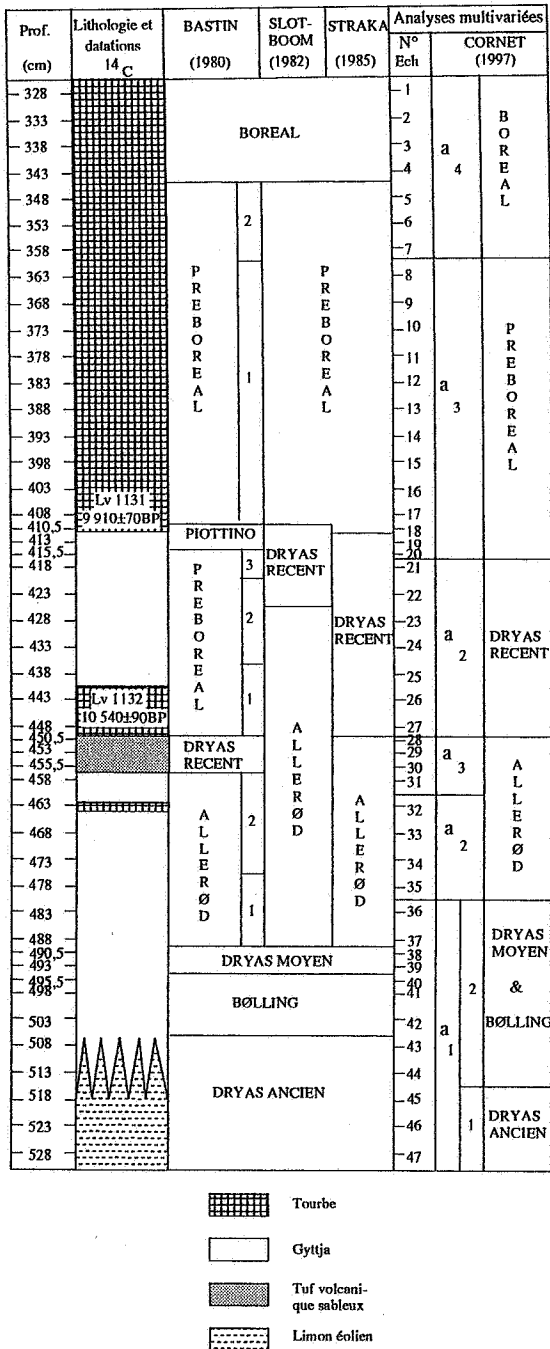


Figure 3. Interprétations du diagramme pollinique de Bastin au Hinkelsmaar (Eifel occidentale).

tillons dont la fusion conduit à la plus petite augmentation de la variation intra-groupe ou somme des carrés des écarts (S.C.E.).

La classification des échantillons, conduite sans contrainte stratigraphique, a l'avantage de définir des groupements d'échantillons quelle que soit leur position stratigraphique et de préciser les relations entre eux sans a priori (Grimm, 1987). Elle permet en outre d'éviter les effets de chaînage entre échantillons qui peuvent survenir par la méthode dite contrainte et qui entraînent des regroupements inappropriés.

2.2.4. Logiciels

Nous avons utilisé sur un Digital VAX 6220 le logiciel Clustan (Wishart, 1978) pour la classification hiérarchique des données et pour l'ACP et l'AFC les procédures de Depiereux *et al.* (1986). Quant à la DCA, un Power Macintosh émulant un PC s'est acquitté de la tâche grâce au programme DECORANA (version 1.0 ; Hill, 1994).

3. RESULTATS DES ANALYSES MULTIVARIABLES

3.1. CLASSIFICATION DES ÉCHANTILLONS

L'examen de la figure 4 obtenue par la classification hiérarchique met en évidence des groupes constitués d'échantillons suffisamment similaires par leur contenu en pollens. Ils définissent ainsi objectivement des «*assemblage zones*» polliniques (Cornet, 1986) selon un découpage adéquat du dendrogramme. Ces derniers correspondent à des tronçons de profondeurs liées à une chronologie des événements bien définie dans la carotte de sondage, et ce bien qu'aucune contrainte stratigraphique n'ait été imposée.

Avec cette technique, certaines informations pourtant importantes, telles que la lithologie, les faciès sédimentaires, les datations absolues etc., ne sont pas prises en compte. Elles n'interviennent que par après, et en même temps que les résultats de l'analyse en composantes principales, pour qualifier les groupes constitués par la méthode de classification précédente.

3.2. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

La comparaison des projections des échantillons et des taxons dans le plan des deux premières composantes principales, obtenues avec ou sans les plantes aquatiques, n'a pas montré de différences notables (Cornet, 1986). C'est la raison pour laquelle nous présentons ci-après les figures obtenues sur les données incluant

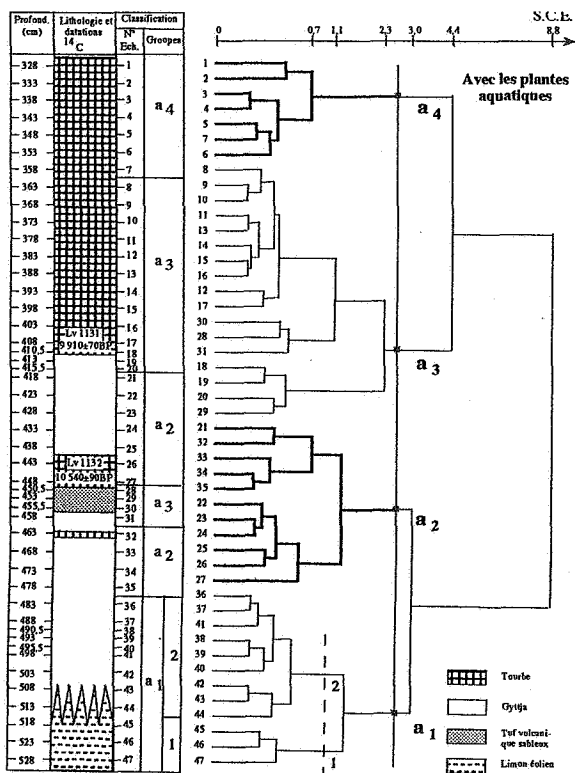


Figure 4. Hinkelsmaar. Etude pollinique. Dendrogramme de la classification hiérarchique effectuée sur les échantillons (méthode de Ward).

tous les taxons. L'information locale dont témoignent les plantes aquatiques ne perturbe en rien le contexte régional rapporté par les autres taxons.

3.2.1. Nuage des échantillons

La répartition des projections des échantillons dans le plan des deux premières composantes principales (figure 5) concorde avec les différents groupes définis par la classification hiérarchique. Le recouvrement de certains groupes d'échantillons est dû au fait qu'une partie seulement de l'information (42,9%) est reconstituée dans cet espace réduit $Y_1 Y_2$.

Le long de la structure en forme de croissant, les 47 échantillons se succèdent dans le sens lévogyre, depuis les plus grandes profondeurs vers les plus petites, hormis le groupe d'échantillons 27 à 21 (figure 5 B). Le gradient sous-jacent à la structure curvilinéaire est donc ici le facteur temps. Ce résultat est particulièrement remarquable, surtout lorsqu'on se rappelle que l'ordre des échantillons et des taxons dans le tableau de données n'influence en aucune façon les résultats des analyses factorielles.

En reliant les échantillons selon la profondeur décroissante, de 47 à 1, l'on observe un tracé oscillant autour

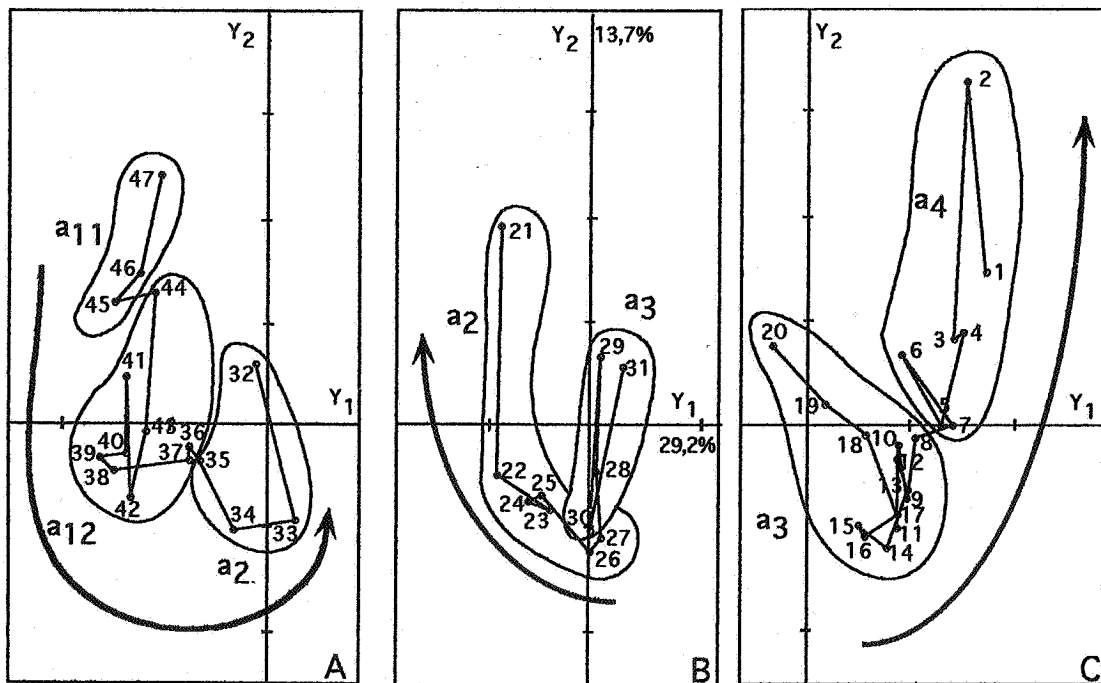


Figure 5. Hinkelsmaar. Etude pollinique. Projection sur le plan des deux premières composantes principales des échantillons 1 à 47 et des groupes d'échantillons a_{11} , a_{12} , a_2 , a_3 et a_4 définis par la méthode de classification hiérarchique. Les flèches indiquent l'ordre des échantillons suivant les profondeurs décroissantes.

de la structure curvilinéaire qui indiquerait une évolution saccadée du couvert végétal. Celle-ci peut notamment résulter entre autres des fluctuations d'échantillonnage, des conditions de sédimentation, des processus de compacité et des modifications post-sédimentaires du contenu pollinique.

3.2.2. Nuage des pollens et spores

La figure 6 montre la projection des pollens et spores dans le plan des deux premières composantes principales ainsi que les informations écologiques disponibles d'après les déterminations polliniques. Les sigles utilisés concernent la température (taxons thermophiles, mésophiles, cryophiles), l'humidité (taxons aquatiques, hygrophiles et xérophiles) et la luminosité (taxons héliophiles).

La structure non linéaire que l'on peut mettre en évidence suggère qu'il est possible de retrouver, dans les données de comptages, un gradient écologique suivant lequel les différents taxons se succèdent en fonction de leur présence optimale dans les échantillons. Ce gradient peut être mis en relation avec une échelle des températures relatives. En effet, on retrouve sur le croissant un pôle de paysage ouvert (notoirement steppique froid en Europe occidentale à la fin du Quaternaire), un pôle forestier boréal voisin d'un pôle forestier tempéré. En revanche, un gradient d'humidité ne s'y distingue guère. Cette interprétation du gradient

reste toutefois tributaire de la précision spécifique des pollens, des spores et des informations écologiques disponibles. De fait, des espèces aux exigences écologiques très différentes, voire opposées, se retrouvent dans un même genre et à fortiori, dans une même famille.

3.3. INTERPRETATION

3.3.1. Dryas ancien

Les échantillons 47, 46 et 45 (groupe a_{11}) se caractérisent par l'augmentation de *Salix* et de *Betula* et en corollaire par la diminution de *Pinus*.

Le peuplement végétal est très ouvert, vu la dominance des plantes herbacées héliophiles. Ces trois échantillons se caractérisent par la prépondérance des taxons xérophiles sur les taxons hygrophiles. La végétation de ce groupe témoigne d'un climat très froid et très sec correspondant au Dryas ancien. Néanmoins, la présence de pollens d'essences arboréennes thermophiles comme *Alnus*, *Tilia* et *Corylus* ne cadre pas avec l'ensemble de la végétation. Des remaniements ou des apports lointains à partir de stations-refuges expliqueraient leur présence. Des apports allochtones sont en effet tout à fait probables puisque ces échantillons ont été prélevés dans le limon éolien (Juvigné, 1980).

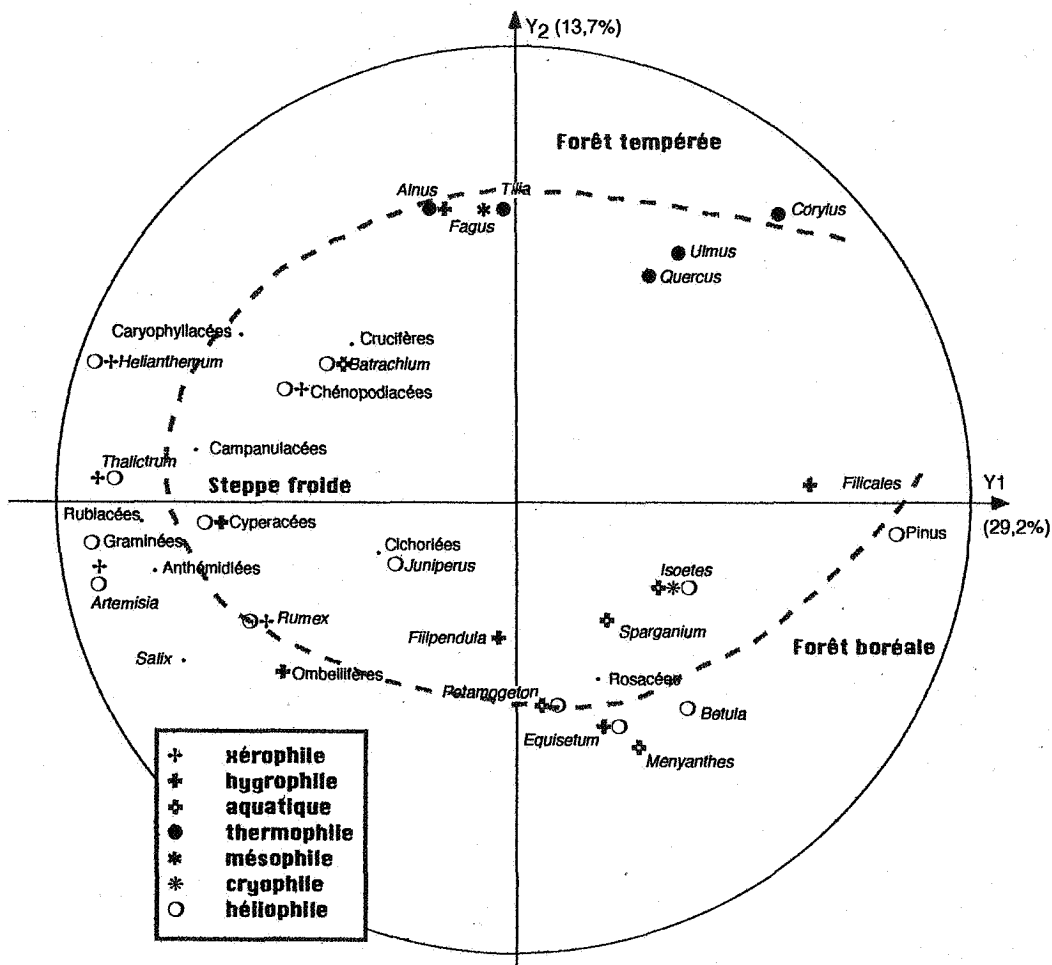


Figure 6. Hinkelsmaar. Etude pollinique. Projection des pollens et spores dans le plan des deux premières composantes principales avec indications des données écologiques disponibles. La structure curvilinéaire est soulignée par un trait discontinu.

3.3.2. Bølling - Dryas moyen

Les échantillons 44 à 36 du sous-groupe a_{12} correspondent au Bølling - Dryas moyen (figure 3) : *Betula* s'accroît, *Salix* demeure très abondant et les ombellifères progressent tandis que les plantes xérophiles régressent. L'importance des espèces herbacées atteste d'un climat très froid, mais un peu plus humide que précédemment.

3.3.3. L'Allerød

Les échantillons 35 à 32 (groupe a_2) caractérisent une forêt de *Betula*, associée à *Salix* et *Pinus* (en progression), également ponctuée de clairières, ce dont témoignent les espèces herbacées. Le climat est moins rigoureux que précédemment mais plus humide comme le montrent les plantes aquatiques telles que *Isoetes*, *Batrachium* et les espèces liées aux milieux humides (*Ombellifères*, *Filipendula* et *Equisetum*). Les échantillons 31 à 28 (groupe a_3) se caractérisent par les taxons aquatiques (*Batrachium*, *Potamogeton*,

Menyanthes et *Isoetes*) et hygrophiles (*Ombellifères* et *Equisetum*). Les espèces herbacées xérophiles sont très peu représentées. On note également la présence d'essences arboréennes thermophiles (*Tilia*, *Quercus*, *Ulmus*, *Corylus* et *Alnus*). *Fagus* est aussi présent dans ce groupe. *Betula* régresse de même que *Corylus*. Le climat devient plus tempéré et beaucoup plus humide que précédemment.

Ces deux groupes a_2 et a_3 ont été attribués à l'Allerød (figure 3) en accord avec l'analyse de la végétation, l'interprétation téphrochronologique et la datation ^{14}C Lv 1132.

3.3.4. Le Dryas récent

La succession des échantillons 27 à 21 (groupe a_2) le long de la structure en croissant s'effectue ici dans le sens horlogique (figure 5B). L'évolution régressive de la végétation, du pôle forestier boréal vers le pôle de steppe froide (figure 6), indique un retour à des conditions climatiques plus froides. Cette modification climatique correspond au Dryas récent puisqu'elle se si-

tue après le dépôt du tuf volcanique daté de la fin de l'Allerød. Cette interprétation, étayée en outre par la datation ^{14}C Lv 1132 : $10\,540 \pm 90$ BP, est en accord avec celle de Straka (1985), à l'exception des échantillons 20 et 19 que nous rattachons au Préboréal (figure 3).

La végétation du Dryas récent se caractérise par l'abondance de *Pinus*, la présence significative de *Salix* et le recul de *Betula*. La régression des plantes herbacées liées aux prairies humides, en même temps que celle des plantes aquatiques et, au contraire, l'extension des plantes herbacées xérophiles témoignent d'un abaissement de l'humidité du climat.

3.3.5. Le Préboréal

La série des échantillons de 20 à 8 (groupe a_3) reprend à nouveau le sens lévogyre le long de la structure courbe (figure 5C) qui correspond sur le gradient écologique à un réchauffement du climat. C'est pourquoi ces échantillons ont été rattachés au Préboréal, en accord avec la datation ^{14}C Lv 1131 : $9\,910 \pm 70$ B.P. (figure 3). Les échantillons 20, 19 et 18 se distinguent par la diminution de *Batrachium*, la présence de *Juniperus*, l'importance de *Isoetes*, le recul de *Betula* et des plantes xérophiles comme *Rumex*, *Artemisia* et *Thalictrum*. La végétation des échantillons 17 à 8 est celle d'une forêt de *Betula* et de *Pinus* y compris des espèces arboréennes thermophiles telles que *Quercus*, *Ulmus* et *Corylus*. En revanche, les plantes herbacées héliophiles sont peu représentées. L'humidité du climat s'affirme par l'importance des espèces aquatiques ainsi que par les ombellifères. Le climat est donc tempéré humide.

3.3.6. Le Boréal

L'importance des espèces arboréennes et la faible représentation des plantes herbacées des échantillons de 7 à 1 (groupe a_4) expriment une végétation forestière dense où *Corylus* devient dominant à l'inverse de *Pinus* et *Betula* qui régressent. Les plantes aquatiques et hygrophiles y sont peu représentées. La végétation rend compte d'un climat tempéré plus sec. Ces échantillons sont attribués au Boréal.

4. DISCUSSION

4.1. DEBUT DE L'ALLERÖD

En observant cette limite particulière présentée à la figure 3, il peut sembler curieux de voir le décalage qui oppose les interprétations des trois palynologues (Bastin, 1980; Slotboom, 1982 et Straka, 1985) à celle de l'auteur dans cette étude. Les premiers placent la limite de l'Allerød à la base de l'échantillon 37/488

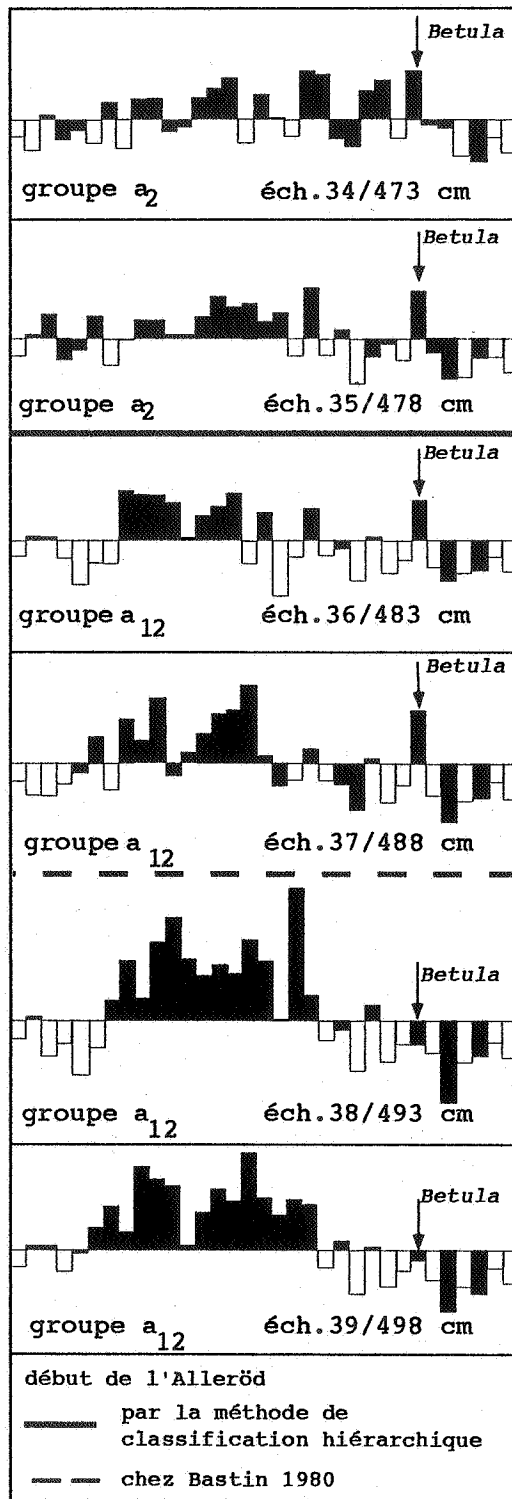


Figure 7. Hinkelsmaar. Etude pollinique. Profil de la végétation par échantillon. En abscisse, les taxons sont classés suivant leur succession obtenue en faisant tourner un rayonneur, dans le sens lévogyre, autour de l'origine des deux premières composantes principales. L'ordonnée représente le logarithme de l'abondance standardisé selon les taxons. Une valeur positive représente une abondance supérieure à la moyenne pour l'ensemble des échantillons. Une valeur négative indique une abondance inférieure à la moyenne. Un taxon absent est représenté par un rectangle blanc.

cm, caractérisée par l'augmentation subite et très marquée de *Betula* (figure 2). Ils considèrent ce phénomène comme le signal d'un changement climatique important. Dans cette étude, cette limite, remontée à la base de l'échantillon 35/478 cm, est établie par la méthode de classification hiérarchique (figure 4). Le dendrogramme qui en résulte montre bien le regroupement des couples d'échantillons 39 (498 cm) - 38 (493 cm) et 37 (488 cm) - 36 (483 cm) (groupe a₁₂) qui se démarquent du couple 35 (478 cm) - 34 (473 cm) (groupe a₂).

Cet écart à propos du début de l'Allerød trouve son explication dans le fait que les méthodes d'analyses multidimensionnelles ont été utilisées de manière à ne privilégier aucun des taxons. Une autre représentation (figure 7), celle des profils de végétation (Depiereux *et al.*, 1983), exprimant la composition et la richesse floristique à chaque profondeur échantillonnée, permet une lecture globale de l'évolution de l'ensemble des taxons. Sur ces profils, au-delà de la limite exprimée par le pic de *Betula* (à la base de l'échantillon 37/488 cm), se dessine par ailleurs une autre limite (à la base de l'échantillon 35/478 cm) qui oppose deux groupes de profils a₁₂ et a₂ aux caractéristiques végétales différentes.

4.2. INCLURE OU NON LES PLANTES AQUATIQUES ?

Après avoir publié dans un premier temps un diagramme pollinique sur la totalité des taxons (1980), Bastin a proposé ensuite une variante (figure 8) où cette fois a été retiré des comptages l'ensemble des plantes aquatiques (inédit, *in* Cornet, 1986). Ce retrait donne lieu, par le jeu des pourcentages, à une amplification artificielle des teneurs relatives de l'ensemble des taxons des échantillons où précisément ces plantes aquatiques atteignaient des grandeurs élevées (de 455,5 à 450,5 cm dans le tuf volcanique, plus de 50%, et de 413 à 410,5 cm, 64,3% en moyenne). Cette manipulation entraîne, par exemple, une distorsion des graminées (30,1% à 450,5 cm et de *Pinus* (42,1%) à 410,5 cm inexistante lorsque les teneurs sont exprimées en valeurs absolues (figure 9). Afin de réduire cet artefact, il conviendrait à l'avenir de calculer le pourcentage des taxons sur un nombre de comptage total constant et suffisant de (A.P. + N.A.P.) qui fournissent une information régionale, en comptant de manière indépendante les plantes aquatiques riches en information locale.

4.3. ISOETES, INDICATEUR CLIMATIQUE ?

S'il est vrai que l'aire de distribution européenne de cette plante aquatique est arctique-alpine (HEGI,

1935), il n'en reste pas moins un certain nombre de questions sur sa définition écologique. Ainsi selon Dussart (1966, p. 306-307), les «*Isoetes* jouent un rôle dans la répartition du benthon des lacs aux eaux acides où ils se développent et tout particulièrement dans les régions montagneuses ou froides». En revanche, l'interprétation d'*Isoetes* comme indicateur climatique froid n'est pas unanimement admise : elle témoignerait plutôt d'un lac oligotrophe (Straka, 1985, p. 205; Lang, 1994) et même très transparent (Frenzel, 1986, communication personnelle).

Le diagramme pollinique, selon notre interprétation, montre que les deux expansions importantes d'*Isoetes*, indice d'une inondation maximale du Hinkelsmaar, se produisent à proximité de changements climatiques : à l'Allerød final (41% à 453 cm, 32% à 450,5 cm) et au début du Préboréal (57,8% à 413 cm et 70,8% à 410,5 cm). Le développement d'*Isoetes* pourrait dès lors annoncer une évolution de l'ouverture paysagère liée à une modification de la température que ce soit dans le sens du réchauffement ou celui du refroidissement climatique.

Quels facteurs physico-chimiques et biologiques dépendants des modifications climatiques influenceraient-ils sa distribution ? Peu d'informations sont disponibles. Le pouvoir concurrentiel de cette plante aquatique n'est pas connu. Nous ne savons guère sur la régularité et la quantité de sa sporulation et sur sa dispersion (comme c'est, par exemple, le cas plus connu de *Sphagnum*).

Le diagramme pollinique du Hinkelsmaar illustre donc bien la problématique des plantes aquatiques. En déduire la signification écologique en ne privilégiant qu'un seul facteur physico-chimique ne doit être proposé qu'en prenant certaines précautions. En effet, la température n'agit pas indépendamment des autres paramètres. Ceci permet d'expliquer les raisons pour lesquelles en montagne et/ou sous les hautes latitudes, les milieux acides et oligotrophes sont de loin plus fréquents qu'en régions chaudes.

5. CONCLUSIONS

Bastin a établi en 1980 un diagramme pollinique sur les sédiments issus du Hinkelsmaar (Eifel, Allemagne), petite cuvette lacustre d'origine volcanique. La traduction qu'il en fait est fortement influencée par l'abondance des spores d'*Isoetes echinospora* Dürieu qu'il considère comme indicateur d'une péjoration climatique. Deux autres palynologistes à leur tour, Slotboom et Straka, ont critiqué ses conclusions en apportant leurs variantes propres concernant les limites de biozones et nuancé quelque peu sa réflexion sur la chronostratigraphie.

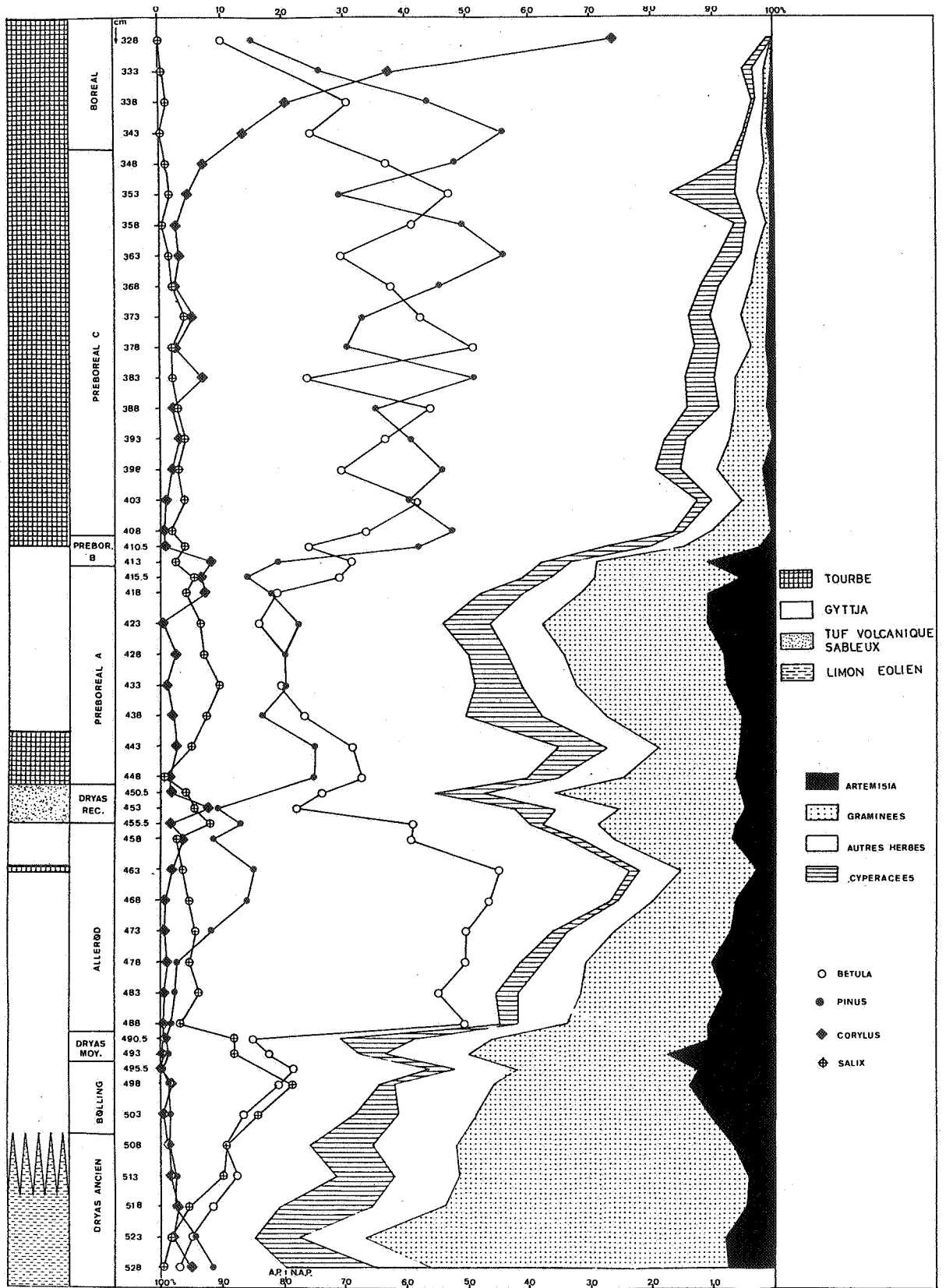


Figure 8. Hinkelsmaar. Diagramme pollinique de Bastin. Les plantes aquatiques sont retirées des comptes.

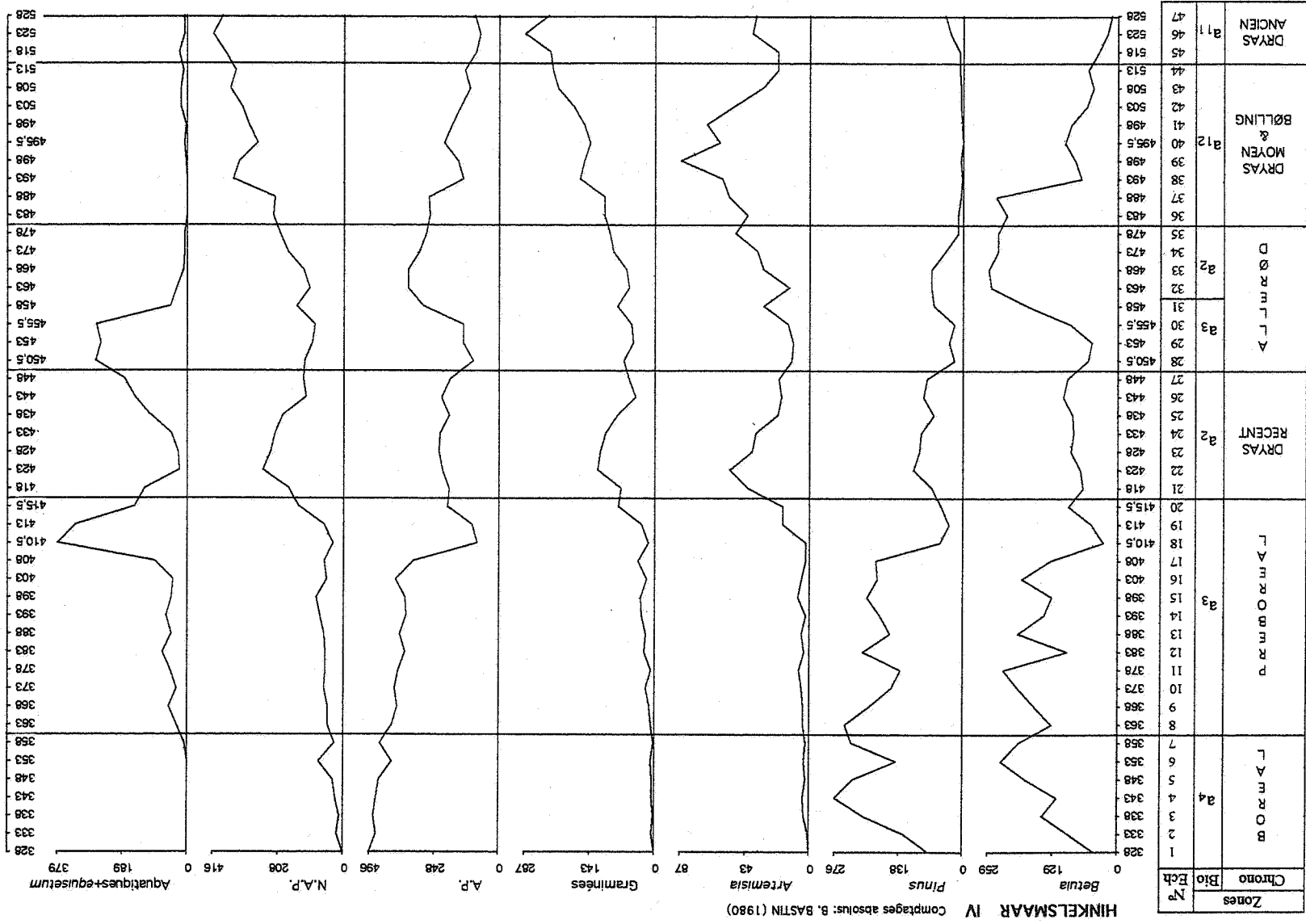


Figure 9. Hinkelsmaar. Diagramme pollinique succinct des comptages absolus de Bastin.

tigraphie. Ces trois interprétations sur le même diagramme se situent parfois aussi en désaccord avec les datations ^{14}C et la téphrochronologie.

Les méthodes d'analyses multivariées appliquées sur les comptages polliniques de Bastin nous incitent au travers de cette étude à proposer une nouvelle interprétation assez proche, il est vrai, de celle de Straka. Néanmoins, les résultats obtenus ne permettent pas de séparer le Bølling tempéré de la crise froide du Dryas moyen car l'impact reconnu de ce dernier sur la végétation n'aurait pas été suffisamment déterminant. Par ailleurs, ces méthodes n'ont pu mettre en exergue l'oscillation froide de Piottino soutenue par Bastin au sein du Préboréal, tout comme n'a pas été prouvée la prétendue notion écologique conférée à *Isoetes* comme indicateur d'une détérioration climatique.

6. BIBLIOGRAPHIE

BASTIN, B., 1980. Mise en évidence et datation ^{14}C de l'oscillation préboréale de Piottino dans un nouveau diagramme pollinique réalisé dans le Hinkelsmaar (Eifel occidentale). *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 103: 87-95.

BASTIN, B., 1982. The Late Glacial and Preboreal in the Hinkelsmaar pollen diagrams : further comments. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 105: 45-50.

BENZECRI, J.-P. *et al.*, 1982. L'analyse des données. II. L'analyse des correspondances, quatrième édition. *Dunod*, 632 p.

BIRKS, H.J.B. & BIRKS, H.H., 1980. Quaternary Palaeoecology. Arnold Edward, 289 p.

CORNET, C., 1986. Contribution à l'étude de l'évolution paléocologique de la fin du Quaternaire dans les Vosges et l'Eifel, d'après les diatomées d'eau douce. Dissertation doctorale, Université Catholique de Louvain, 176 p.

CORNET, C., DEWEZ, N. & MICHEL, A., 1983. Réalisation d'«assemblages-zones» à partir d'un traitement statistique effectué sur les comptages de diatomées fossiles. *Cryptogamie Algologie*, 3: 341.

DAGNELIE, P., 1975. L'analyse statistique à plusieurs variables. *Duculot, Gembloux*, II, 362 p.

DEPIEREUX, E., FEYTMANS, E. & MICHA, J.C., 1983. Utilisation critique de l'analyse en composantes principales et du cluster analysis pour la description d'échantillons d'invertébrés benthiques en eau douce. *Oikos*, 40: 81-94.

DEPIEREUX, E., ORBAN-FERAUGE, F. & FEYTMANS, E., 1986. Procédures pour l'analyse multivariée. Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Faculté des Sciences, 21 p., 3 annexes.

DUSSART, B., 1966. Limnologie, l'étude des eaux continentales. Gauthier-Villars, Paris, coll. *Géobiologie-Ecologie-Aménagement*, 676 p.

ERLENKEUSER, H. & WILLKOMM, H., 1971. University of Kiel Radio-carbon Measurements VI. *Radiocarbon*, 13/2: 325-339.

GRIMM E. C., 1987. Coniss : a fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences*, 13/1: 13-35.

HEGI, G., 1935. Illustrierte Flora von Mittel Europa. Band I. *J.F. Lehmanns Verlag*, München, 528 p.

HILL, M.O. & GAUCH, Jr., 1980. Detrended correspondence analysis : an improved ordination technique. *Vegetatio*, 42: 47-58.

HILL, M. O., 1994. Decorana and Twinspan, for ordination and classification of multivariate species data : a new edition, together with supporting programs, in Fortran 77. *Huntingdon : Institute of Terrestrial Ecology*, 58 p.

JUVIGNE, E., 1980. Révision de l'âge de volcans de l'Eifel occidentale. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 24/3: 345-355.

LANG, G., 1994. Quartäre Vegetationsgeschichte Europas. Methoden und Ergebnisse. *Springer Verlag*, 462 p.

LECLERCQ, L. & DEPIEREUX, E., 1987. Typologie des rivières oligotrophes du massif Ardennais (Belgique) par l'analyse multivariée de relevés de diatomées benthiques. *Hydrobiologia*, 153: 175-192.

NOY-MEYER, I., 1973. Data transformation in ecological ordination. On the meaning of data standardisation. *Journal of Ecology*, 63: 779-800.

SLOTBOOM, R.T., 1982. The Late Glacial and Preboreal in the Hinkelsmaar pollen diagrams : a comment. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 105: 41-44.

STRAKA, H., 1958. Ein spätglaziales Pollendiagramm aus dem Hinkelsmaar bei Manderscheid (Vulkaneifel). *Flora*, 146: 412-424.

STRAKA, H., 1960. Zwei postglaziale Pollendiagramme aus dem Hinkelsmaar bei Manderscheid (Vulkaneifel). *Descheniana*, 112/2: 219-241.

STRAKA, H., 1961. Relative und absolute Datierung quartärer Ablagerungen. *Die Naturwissenschaften*, 48/9: 324-332.

STRAKA, H., 1975. Die spätquartäre Vegetationsgeschichte der Vulkaneifel. *Beiträge zur Landespflege in Rheinland-Pfalz*, 3, 163 p.

STRAKA, H., 1985. L'histoire tardi- et post-glaciaire de la végétation de l'Eifel volcanique (Allemagne de l'Ouest). *Ecologia Mediterranea*, XI/1: 99-105; 201; 205.

WISHART, D., 1978. Cluster analysis package. Edinburg University, 175 p.

WOILLARD, G., 1975. Recherches palynologiques sur le Pléistocène dans l'est de la Belgique et dans les Vosges lorraines. *Acta Geographica Lovaniensia*, 14, 118 p.

Manuscrit reçu le 12.03.1996 et accepté pour publication le 05.07.1997.