

ÉTUDE D'UNE COUPE DÉGAGÉE A TRAVERS UN REMPART D'UNE CICATRICE DE PINGO DE LA BRACKVENN (*) (**)

par B. BASTIN (***), E. JUVIGNÉ (****), A. PISSART (****),
J. THOREZ (*****)

(8 fig. et 1 tableau dans le texte et 1 fig. hors-texte)

RÉSUMÉ

Des observations relatives à la composition et à la disposition des couches dans le rempart d'une cicatrice de pingo amènent à l'idée que ce rempart s'est constitué sous l'effet d'une poussée profonde induite par apparition de glace de ségrégation.

La granulométrie et l'étude des minéraux denses et des minéraux argileux ont permis de reconnaître dans les diverses couches la part des matériaux d'altération du substrat et des matériaux allochtones.

Un niveau de poussières volcaniques d'une composition originale non encore reconnue en Belgique a été identifié et situé par la palynologie après l'Interstade d'Arcy-Stillfried B.

ABSTRACT

Observations concerning the composition and arrangement of the beds in a rampart of a pingo scar suggest that this rampart was formed under the influence of thrusting induced by formation of deep segregation ice.

The relative importance of allochthonous materials and those formed by weathering of the substrate has been determined by study of the granulometry, heavy minerals and clay minerals.

A layer of volcanic dust previously unknown in Belgium has been identified. Using palynological techniques it can be situated after the Arcy-Stillfried B interstadial.

INTRODUCTION

Une coupe à travers un rempart de pingo (+) a été dégagée au moyen d'une

(*) Communication présentée le 7 mai 1974, manuscrit déposé le 1^e juillet 1974.

(**) Cette étude a été subventionnée par le F.N.R.S., sous la forme d'un Crédit aux Chercheurs accordé à B. Bastin, E. Juvigné et A. Pissart.

(***) Université de Louvain, Laboratoire de Palynologie et de Phytosociologie, place Croix du Sud 4, 1348 Louvain-la-Neuve.

(****) Université de Liège, Laboratoire de Géologie et Géographie physique, 7 place du Vingt-Août, B-4000 Liège.

(*****) Université de Liège, Laboratoire de Minéralogie, 7 place du Vingt Août, B-4000 Liège.

(+) L'ensemble des données dont on dispose actuellement montre que les buttes périglaciaires qui ont donné les formes étudiées ici étaient formées de glace de ségrégation et non de glace d'injection. Ce ne sont donc pas des pingos au sens où on l'entendait jusqu'à présent. Cependant, comme actuellement il semble que la glace de ségrégation joue un rôle important dans la croissance des pingos les plus typiques, la nomenclature doit être revue. En attendant un progrès des connaissances, le terme « pingo », probablement impropre, mais généralement employé pour les formes des Hautes Fagnes, est conservé dans ce travail.

pelle mécanique en novembre 1973. Cette coupe a été réalisée en vue de l'étude d'éventuelles traces de glaciation sur le plateau des Hautes Fagnes. La connaissance détaillée des conditions d'apparition de ces pingos, de leurs mécanismes de croissance et de leur âge est en effet susceptible d'apporter des éléments déterminants dans le problème, toujours débattu, d'une éventuelle glaciation sur le plateau des Hautes Fagnes.

A ce jour, peu d'observations ont été publiées qui permettent de se faire une idée de la structure interne des remparts des traces de pingos. Rappelons à ce sujet cependant que A. PISSART (1963) a décrit une structure arquée dans un rempart du Pays de Galles. Il interprétait cette disposition comme le résultat du déplacement du matériel profond lors de la croissance de la masse de glace. En 1969, H. SVENSSON a défendu la même hypothèse en expliquant que seule une force interne pouvait rendre compte de la régularité du rempart. La majorité des auteurs pensent, toutefois, que le rempart est dû à une descente de matériel soulevé le long de la pente du pingo comme le rappelle G. F. MITCHELL (1973).

La difficulté de creuser dans les régions marécageuses où se localisent généralement les traces de pingos explique le nombre restreint d'observations. Pour creuser le plus profondément possible sans utiliser une pompe, nous avons étudié le rempart d'un pingo situé sur une pente marquée.

LOCALISATION DE LA FORME ÉTUDIÉE

La figure 1 montre la localisation du pingo étudié. Il est situé dans la Fagne de la Brackvenn, à 800 m de la route Eupen-Montjoie, sur le versant ouest de la vallée de la Getz-Bach. Cette cicatrice de pingo fait partie d'un groupe d'une dizaine de formes alignées selon un axe N.E.-S.O. Deux sondages ont été réalisés par le Service Géologique de Belgique pour reconnaître les caractères du substrat et de la couverture de cette zone à pingos. Ils ont montré (PISSART, 1974) une très intense altération affectant sur plus de 20 m les phyllades et les quartzites reviniens (Cambrien) qui constituent le substratum de la région. Au-dessus de ce niveau altéré existent quelques mètres de dépôts de pente incorporant essentiellement limon éolien et éléments provenant du bed-rock altéré. La figure 2 présente un profil transversal de cette forme suivant la pente générale du terrain. La figure 3 en montre une vue prise en direction de l'Ouest.

DESCRIPTION DE LA COUPE

La figure 4 donne un schéma de la coupe dégagée dans le rempart de la trace de pingo. Nous en décrirons les principaux éléments en commençant par le remplissage.

En bordure de la dépression centrale, la pelle mécanique a entaillé sur une distance horizontale de 3 m le remplissage tourbeux. La partie supérieure est constituée de tourbe noire (1) (*). Elle surmonte une épaisseur de près de 1 m de Gyttja qui comprend de petits cailloux (2). Cette formation repose à l'extrémité de l'excavation sur 80 cm de limon argileux de couleur bleue, englobant également des petits débris de phyllade (3).

(*) Ce chiffre et les chiffres suivants mis entre parenthèses dans le texte, renvoient le lecteur aux emplacements indiqués par les mêmes chiffres sur la figure 4.

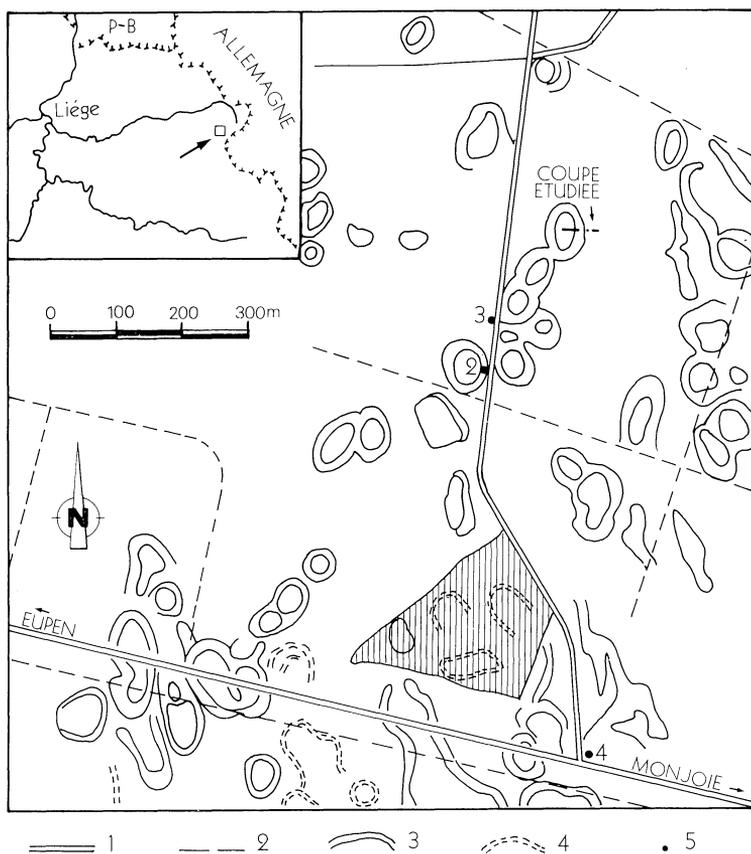


Fig. 1. — Schéma de la localisation du rempart étudié.

1. Route; 2. Drains; 3 et 4 Remparts de pingo; 5. Points de sondages.

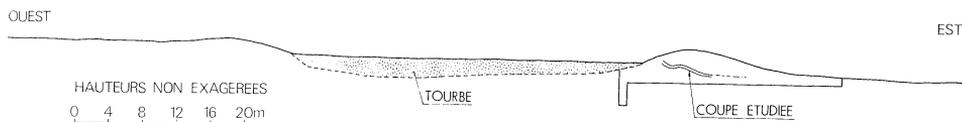


Fig. 2. — Profil topographique à travers la trace de pingo étudiée.

Sous le limon argileux (3) une fouille de près de 3 m de profondeur a été réalisée. Elle a montré l'existence de limon gris brun (4 et 5) englobant de nombreux blocs de quartzite revinien dont la taille atteint 30 à 40 cm.

Dans la partie interne du rempart, la couche (4) est surmontée d'une couche de couleur légèrement différente. Le contact entre les deux dépôts dessine de grandes langues obliques (6) et (7).

Au dessus, le complexe (8) est localement constitué de couches s'individualisant par leur coloration : (a) = 2,5 Y 5/2; (b) 2,5 Y 6/4; (c) = 10 YR 5/4; (d) = 2,5 Y 6/6.

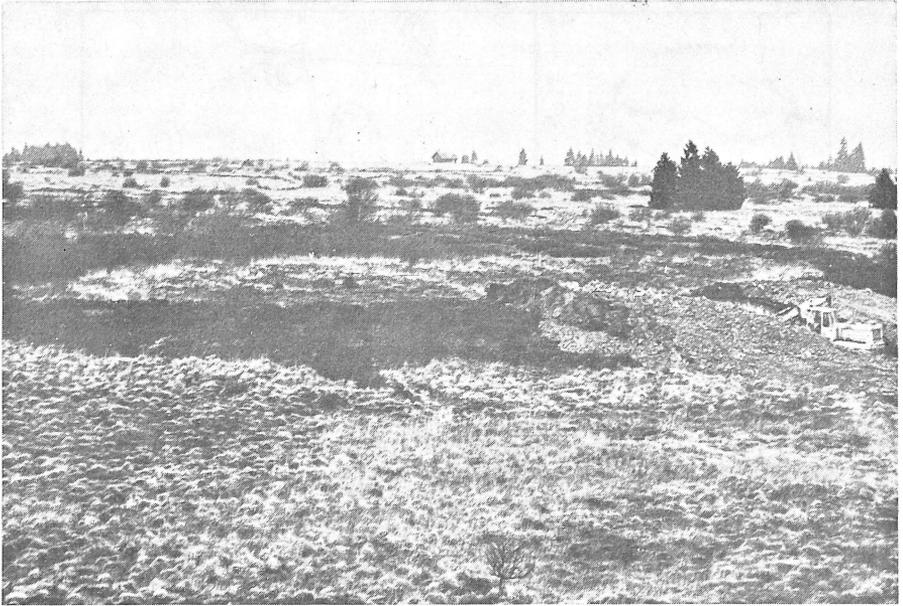


Fig. 3. — Photo de la trace de pingo étudiée.

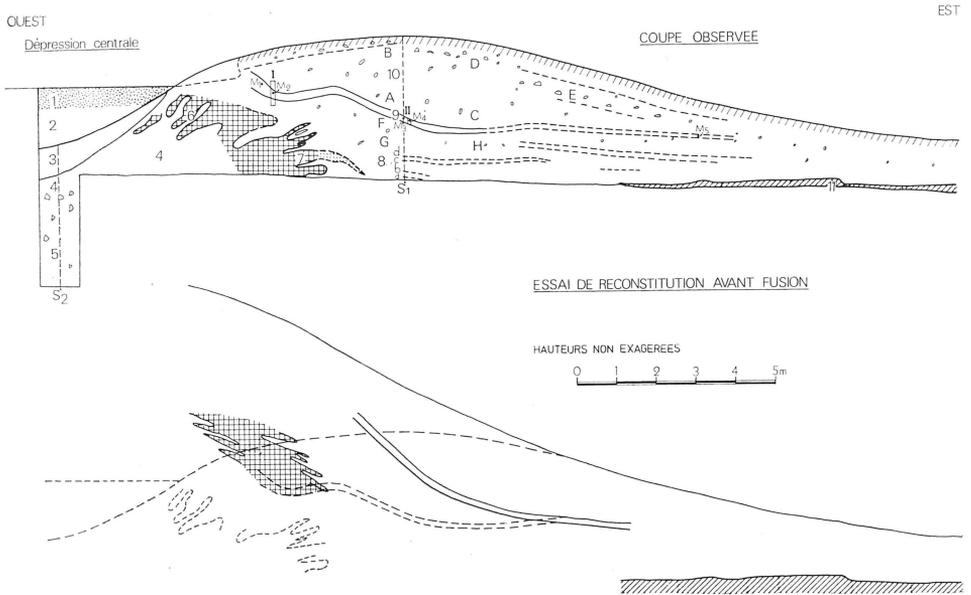


Fig. 4. — Coupe dégagée à travers le rempart de la trace de pingo visible sur la figure 3.

Essai de reconstitution de la forme au moment de son développement maximum.

- A ... H : Localisation des roses d'orientation
- I ... II. désignation des formations lithologiques
- M1 ... M5 : position des maximums de concentration de poussières volcaniques
- S1 et S2 : séquences où les minéraux denses ont été étudiés
- I et II : profils polliniques.

Ce complexe est surmonté par une couche extrêmement apparente (9). Sa couleur grise (5 Y 7/1) contraste vivement avec la couleur des formations voisines (en-dessous 7,5 YR 5/6; au-dessus 10 YR 6/6). Elle ne comprend pratiquement pas de cailloux. Sa teneur en carbone est de 0,34 %, soit le double de la teneur des couches sus et sous-jacentes. Une teneur aussi élevée n'a été retrouvée que dans les horizons supérieurs du sol actuel.

Au dessus de la couche (9) existe une épaisseur variable de matériau qui rappelle le complexe (8) et comprend une proportion variable d'éléments provenant du substratum revinien, notamment de nombreux blocs de quartzite. Près de la surface, un podzol est bien développé sur la partie la plus élevée du rempart.

A la partie externe du rempart, le fond de l'excavation a mis au jour la roche cambrienne en place, sous forme de phyllades très altérés de couleur gris bleu foncé (11).

LES RÉSULTATS DE L'ÉTUDE GRANULOMÉTRIQUE (A. Pissart)

Le limon argileux de couleur bleue (3) comprend entre 25 et 32 % d'éléments inférieurs à 2μ . La fraction des grains inférieurs à 50μ varie de 92 % au sommet de la couche à 65 % à sa base. Un mode peu net existe vers 30μ à la partie supérieure de ce limon argileux; il semble indiquer la présence de limon éolien. Les éléments qui constituent cette couche (3) proviennent du remaniement, par le ruissellement, du versant interne de la dépression. Le classement granulométrique des éléments constitutifs de la couche (4) est médiocre (Q de ϕ de Krumbein = 5,1). Dans la couche (5), le classement est nettement meilleur (Q de ϕ de Krumbein = 1,75). 50 % des éléments sont compris entre 10 et 50μ avec un mode de 30μ . Ces deux observations indiquent la présence de limon éolien.

La couche comprise entre les grands festons (6) et (7) est également bien classée; plus de 50 % des éléments sont compris entre les dimensions de 10 et de 50μ .

Les différences de couleurs notées au sein du complexe (8) correspondent à des variations granulométriques qui témoignent d'une abondance plus ou moins grande de limon éolien. Celui-ci est particulièrement abondant dans la couche (8) (mode 28μ).

La couche (9) se présente comme un limon bien classé (Q de ϕ de Krumbein 1,65) avec toutefois 20 % d'éléments plus petits que 2μ et 5 % d'éléments plus grands que 100μ . Il s'agit donc d'un mélange de limon éolien avec des éléments provenant de la désagrégation du substratum. Cette couche (9) présente une épaisseur constante et ses contacts avec les couches supérieure (10) et inférieure (8) sont très réguliers. Elle ne peut donc s'être mise en place sur le versant du pingo dont la pente devait être supérieure à 20° et n'a subi aucun remaniement par les agents de transport en masse sur ce même versant. En conséquence, nous pensons que cette couche (9) était fossilisée par la couche (10) au moment de la croissance du pingo. Son allure actuelle plissée vers l'intérieur du rempart résulte de mouvements de poussée provoqués par le développement de la glace au sein du pingo.

Les caractères granulométriques de la couche supérieure (10) sont identiques à ceux du complexe (8). Près de la surface, dans les horizons pédologiques récents, l'importance du limon éolien est plus grande, un mode granulométrique net existant aux environs de 26μ .

En résumé, l'étude granulométrique a montré que le rempart du pingo est constitué essentiellement de limon éolien et d'éléments provenant du substratum paléozoïque. Le limon éolien est presque pur dans la couche (9).

LA DISPOSITION INDIVIDUELLE DES CAILLOUX
AU SEIN DU REMPART (A. Pissart)

Au sein de la couche (10) la disposition individuelle des cailloux a été mesurée en 8 endroits différents localisés sur la figure 4 par les lettres A à H. Les roses d'orientation obtenues sont données sur la figure 5. Elles montrent que la majorité des cailloux sont orientés tangentiellement à la courbure en plan du rempart. Cette disposition est d'autant plus marquée que les cailloux sont enfouis à plus de profondeur dans la couche (10) et sont proches du centre du rempart. En outre dans cette couche, un grand nombre de cailloux sont disposés verticalement dans le rempart, disposition qui avait déjà été notée par A. PISSART (1963) dans le rempart d'un autre pingo du plateau des Hautes Fagnes.

En dessous de la couche (9) la disposition des cailloux est différente. Ils sont disposés perpendiculairement à la direction préférentielle notée au dessus de cette couche. Ils sont donc orientés dans le sens de la pente générale du terrain. La grande majorité des cailloux est inclinée vers le centre de la dépression. Cette disposition est celle qui correspond à un dépôt de pente mis en place sur le versant incliné vers l'est qui existait avant l'apparition de la butte périglaciaire.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

L'ensemble du rempart étudié est constitué de dépôts de pente. Ceux-ci comprennent une quantité très importante d'éléments provenant de l'altération du substratum paléozoïque et aussi beaucoup de limon éolien comme le confirme l'étude des minéraux denses donnée plus loin. Ces dépôts de pente paraissent être essentiellement des dépôts de congélifluxion. La couche très limoneuse et peu caillouteuse (9) a sans doute été mise en place par ruissellement, sur la pente très faible (2°) qui existait avant la croissance du pingo. La granulométrie exclut l'hypothèse qu'il s'agisse d'un limon éolien non remanié.

Cette couche limoneuse a subi postérieurement à son dépôt un soulèvement puis un affaissement qui lui a donné un tracé onduleux. Elle conserve actuellement une pente supérieure à 20° dans la partie qui épouse le tracé extérieur du rempart, et dessine une ondulation anticlinale qui rappelle la structure arquée décrite dans le rempart d'un pingo du Pays de Galles. (A. PISSART, 1963).

Cette disposition indique que des matériaux sous-jacents à cette couche ont été déplacés au moment de la formation de la glace. Postérieurement à la fusion de celle-ci, les couches n'ont donc pu revenir dans leur position originelle et ont donné la structure que nous observons aujourd'hui. Cette observation confirme donc, comme A. PISSART l'avait écrit en 1963, que le rempart n'est pas seulement dû à la descente de sédiments sur les pentes du pingo, mais en partie du moins, à un effort de poussée profond de la masse de glace en croissance dans le sol.

L'essai de reconstitution du pingo que nous présentons à la figure 4 a été tenté en conservant une pente continue à la couche (9) et en donnant au pingo une pente constante dans la zone reconstituée. Elle nous conduit à donner une pente extérieure de 22° au versant du pingo. En basculant les formations inférieures de façon à suivre cette reconstitution, les plissements (6 et 7) prennent une inclinaison nette, dirigée vers l'extérieur du pingo. Toutefois, étant donné que de tels glissements en masse n'affectent pas les couches supérieures et notamment la couche (9), nous considérons qu'il est vraisemblable que ces plissements sont dus à des efforts de poussée de la

masse de glace en croissance. Nous excluons donc qu'ils aient pu se former par glissement en masse le long du rempart.

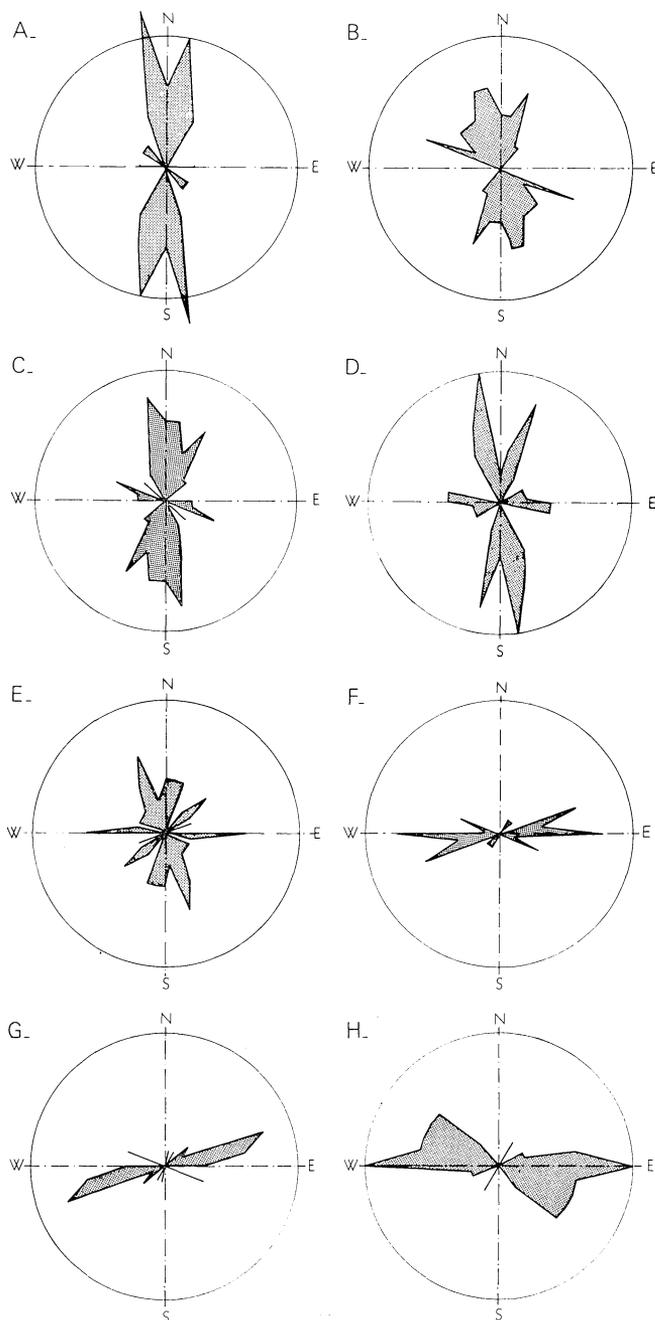


Fig. 5. — Roses d'orientation des cailloux compris dans le rempart; les lettres permettent la localisation des mesures sur la figure 4.

La disposition individuelle des cailloux dans la couche (10) et l'épaississement de cette même couche vers l'extérieur du rempart ont pu être acquis par un effort de poussée au sein du rempart à la suite du mouvement de croissance du pingo. Ce mouvement n'aurait donc pas consisté en un simple soulèvement vertical, mais aurait présenté une certaine composante latérale.

Ces observations paraissent établir que la part des agents de transport en masse est négligeable dans la construction des remparts étudiés. La poussée oblique des lentilles de glace en croissance suffit à expliquer toutes les caractéristiques observées.

ÉTUDE DES MINÉRAUX DENSES (E. JUVIGNÉ)

Les minéraux denses ont été étudiés tous les 10 cm suivant deux séquences : l'une au milieu du rempart, l'autre dans la cuvette (fig. 4).

Ils ont été extraits des échantillons par une méthode que nous avons décrite précédemment (E. JUVIGNÉ, 1973). Celle-ci permet d'extraire d'un échantillon tous les minéraux denses quelle que soit leur taille. Les minéraux dont la largeur est inférieure à 30 microns n'ont pas été comptés.

1. Les minéraux des limons.

Dans tous les échantillons, les minéraux denses de la fraction limoneuse constituent la presque totalité des minéraux extraits. Ils consistent principalement en hornblende verte (17 à 30 %), épidote (14 à 28 %) et grenat (2 à 15 %) qui ont une origine allochtone (loess), et en ubiquistes dont l'origine est double, allochtone d'une part (loess) et locale d'autre part (désagrégation du substrat).

En comparant les taux des minéraux spécifiques des loess avec ceux obtenus en moyenne Belgique (F. GULLENTOPS, 1954), nous attribuons un âge weichsel à l'ensemble des niveaux étudiés.

2. Les minéraux d'origine volcanique.

Deux associations de minéraux volcaniques ont été reconnues.

a. L'association à enstatite (F. GULLENTOPS, 1954)

Elle est composée d'augite, hornblende basaltique et enstatite. La largeur des minéraux est de l'ordre de 100 microns (figure 6). On en trouve à l'état de traces dans divers niveaux de la séquence située au centre du rempart (S₁).

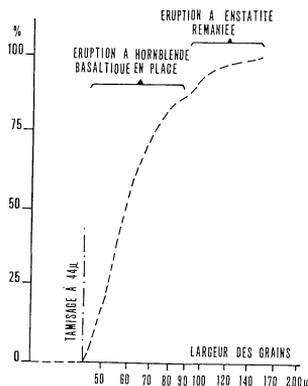


Fig. 6. — Granulométrie des poussières volcaniques d'un échantillon prélevé en M1.

Cette observation confirme donc l'âge weichsel de tous les niveaux de cette séquence (F. GULLENTOPS, 1954; E. JUVIGNÉ, 1973).

Les poussières de cette association n'ont été décelées à aucun niveau de la séquence de la cuvette.

b. *Une association à hornblende dominante*

Elle s'est déposée pendant l'accumulation de la couche (9) au sein de laquelle nous l'avons observée.

Elle consiste presque essentiellement en hornblende basaltique (95 % des minéraux denses volcaniques transparents) accompagnée de quelques pyroxènes, sphènes et zircons. La largeur des grains est de l'ordre de 50 microns.

Par ses caractéristiques, cette association ne peut être assimilée ni à l'éruption à titanoaugite d'Ormont (E. BUSTAMANTE, 1974), ni à l'éruption du Laacher See reconnue en Belgique par F. GULLENTOPS (1954).

Une étude de l'évolution verticale de la concentration de ces poussières suivant cinq sections différentes à travers la couche (9) montre qu'elles s'y trouvent conservées en place.

Pour cette étude, nous avons d'abord isolé par tamisage la fraction granulométrique comprise entre 44 et 297 microns puis extrait tous les minéraux denses à partir de 500 milligrammes (poids sec) de cette fraction.

Nous remarquons (figure 7) que, dans chacune des cinq sections étudiées, la distribution des concentrations de poussières volcaniques présente un maximum très net (M1 à M5) qui correspond à la surface topographique ancienne sur laquelle ces poussières sont tombées.

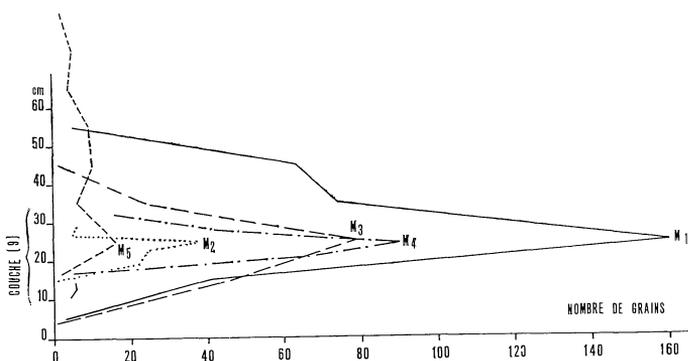


Fig. 7. — Nombre de minéraux denses d'origine volcanique pour 500 mg (poids sec) de la fraction comprise entre 44 et 297 microns.

Deux de ces maxima (M2 et M4) ont été localisés dans les séquences qui ont servi à établir les diagrammes polliniques (I et II). Ces maxima sont d'ailleurs localisés sur les diagrammes de B. Bastin (fig. 9).

La concentration des minéraux volcaniques diminue rapidement vers le bas où ils se sont infiltrés et ont été entraînés par des agents biologiques. La même évolution s'observe vers le haut et s'explique par le remaniement des poussières et aussi l'action de la faune poursuivant ses migrations à travers le niveau fossilisé.

Les variations horizontales des concentrations de poussières volcaniques s'expliquent par de légers remaniements horizontaux qui ont eu lieu avant la fossilisation et aussi par les remaniements postérieurs.

ÉTUDE DES MINÉRAUX ARGILEUX (J. Thorez)

Une vingtaine d'échantillons (*) ont été prélevés en divers endroits du rempart de la cicatrice du pingo. Leur fraction argileuse (inf. à 2μ) a été analysée; les résultats sont à comparer avec ceux obtenus au cours de l'étude du sondage de la Brackvenn (THOREZ *et al.* 1975). La fraction argileuse a été extraite suivant le mode opératoire en cours au Laboratoire des Argiles de l'Institut de Minéralogie.

Deux associations minéralogiques sont représentées (tableau I) : la première est marquée par la nette prédominance d'une illite sur la kaolinite; la seconde compte, outre l'illite, minéral cardinal, et la kaolinite : vermiculite ou un interstratifié irrégulier à feuillets chloritiques et interfoliaires vermiculitiques, soit (14_C-14_V); un

TABLEAU I

Composition minéralogique de la phase argileuse et identification génétique
(L = loess; A = argile du substrat; M = mélange loess + argile)

n° Ech.	Composition minéralogique (*)							Ia (**)	ESQ (***)	Identif.
	I	K	(10— 14 _V)	(14 _C — 14 _V)	V	(10— 14 _M)	Sm			
3 (sup.)	6,6	1,4	1,2				0,8	5	0,3	A
3 (moy.)	8,4	1,6						4	0,5	A
3 (inf.)	8,8	1,2						4	0,4	A
4 sup.	8	2						4,5	0,65	A
4 inf.	8	1,8					Tr.	4	0,5	A
5 sup.	7,2	2,4			0,4			4,5	0,25	M
5 moy.	6	0,8	1,4		0,8	1		8	0,25	M
5 inf.	8,6	0,4						4	0,35	A
6	4,6	0,8	1,2	1,2		1,2	1	6	0,25	M
7	6,4		1	1,6		1		5,5	0,4	M
8 sup.	8	2						4	5	A
8 moy.	5,5	0,8			2		1,7	5	0,25	L / M
8 inf.	6				2	2		5	0,25	M / L
9	5,6	1,2	1		2,2			> 10	0,2	L
10	6	0,8			3,2			4,8	0,4	M
11	8,2	1,4	0,4					4	0,32	A

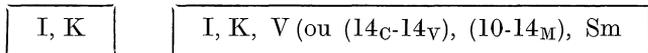
(*) Les numéros d'échantillons correspondent pour la plupart à ceux rapportés à la figure 4. Cependant l'échantillonnage a été plus détaillé.

(*) Les valeurs numériques correspondent à une fréquence relative des constituants (association totale = 10).

I = illite; K = kaolinite; (10-14_V) : interstratifié irrégulier à feuillets d'illite et interfoliaires vermiculitiques; (14_C-14_V) : chlorite ouverte ou interstratifié à feuillets chloritiques et interfoliaires vermiculitiques; V : vermiculite; (10-14_M) : interstratifié irrégulier à feuillets illitiques et à interfoliaires gonflants montmorillonitiques; Sm = smectite.

(**) Ia : indice d'aigu; (***) ESQ : rapport ESQUEVIN (1969) : I (002)/I (001) = Al₂O₃/FeO + MgO.

édifice interstratifié irrégulier à feuillets illitiques et à interfoliaires gonflants de type montmorillonitique soit (10-14_M) ou vermiculitique soit (10-14_V). On relève également la présence de smectite dans certains échantillons. Ces deux groupes d'association peuvent se formuler comme suit :



Bénéficiant des résultats détaillés du sondage de la Brackvenn, dans lequel toutes les variétés de matériau parental — loess, produit d'altération du substrat revinien, mélange des deux matériaux — sont recoupées, l'examen de la minéralogie des argiles relative au pingo nous conduit à l'interprétation suivante.

L'association à illite et kaolinite : I + K marque la minéralogie qui résulte de l'argilisation des roches reviniennes (par exemple les échantillons 3 moyen et inf., c), 4, 5 inf., II, 8 supérieur). L'illite a conservé un état de cristallinité remarquable, son indice d'aigu (ESQUEVIN, 1969) étant compris entre les valeurs de 4 et de 5 mm. D'autre part, la composition de la couche octaédrique des illites suivant le rapport d'intensité (002)/(001) (soit le contenu en Al₂O₃/Feo + MgO) est caractérisé par des valeurs comprises entre 0,3 et 0,65) : ce sont donc des illites relativement alumineuses ainsi qu'il en est des roches argilisées en provenance du substrat revinien dans le sondage de la Brackvenn (THOREZ et al., 1975) (fig. 8).

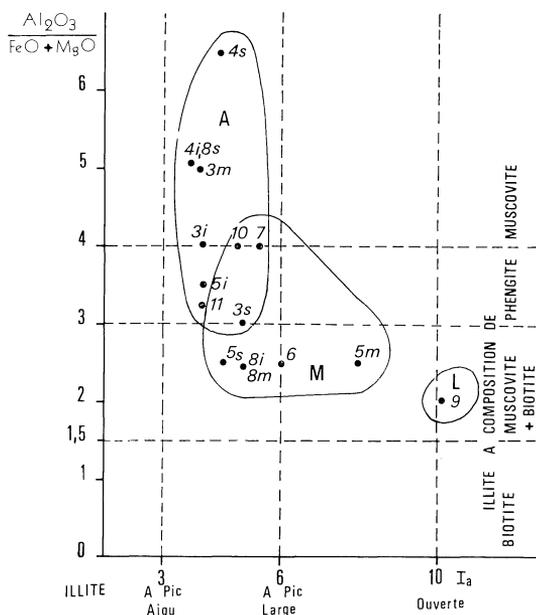


Fig. 8. — Caractérisation des illites suivant la méthode Esquevin.

L'autre association présente des minéralogies diversifiées mais où la présence soit de vermiculite soit d'un interstratifié (10_C-14_V) constitue la marque de fabrication des matériaux loessiques. C'est en particulier le cas de l'échantillon 9.

Quand il s'agit d'un mélange de matériaux en provenance du substrat argilisé

et des limons (ce qui est vérifié également à l'examen granulométrique et par le cortège de minéraux denses), et suivant la proportion relative des deux matériaux parentaux, on constate une association minéralogique caractérisée par la présence de I + K d'une part et de Vermiculite d'autre part. Il s'y mêle parfois une phase (10-14_M) ou (10-14_V) ou de la smectite, mais toujours en faible fréquence relative.

L'échantillon 9 se singularise par la présence d'une illite ouverte (indice d'aigu supérieur à 10); d'autres échantillons (5 inf.; 6, 7, 10) présentent une illite appartenant à la variété à pic large (TRAUTH et al, 1968). L'ouverture des illites — attestée par une valeur d'indice d'aigu plus élevée — est le fait ou d'un mélange d'illite appartenant à la phase limoneuse et à l'argile, produit de l'altération des roches révinienne, ou d'un état de dégradation plus avancé de la fraction illitique. Il est à remarquer, ainsi qu'en témoigne la distribution des échantillons dans la figure (en fonction du degré d'aigu et de la composition Al_2O_3), que le limon (9) contient une illite relativement peu alumineuse et très ouverte ($1_a > 10$; rapport Esquevin : 0,2) d'autre part les matériaux « intermédiaires » (dans lesquels se trouvent mélangés les limons et l'argile d'altération) contiennent tous une illite à pic large ou fermé, mais avec des compositions de la couche octaédrique qui vont d'un pôle très alumineux (prédominance de l'illite en provenance de l'argile) à un pôle nettement moins alumineux (prédominance de la contamination loessique). La représentation des indices d'aigu et des compositions de la couche octaédrique des illites (figure 8) est donc significative si l'on recherche une identification génétique des minéraux. Cette méthode d'identification s'est révélée positive au cours de l'étude du sondage de la Brackvenn.

Il nous apparaît encore démonstratif de rechercher l'origine des matériaux quand les analyses minéralogiques (argiles et minéraux denses) et granulométriques sont confrontées, méthode interdisciplinaire qui a été appliquée au cours de cette étude. Il nous faut également souligner ici que l'analyse des minéraux denses d'une part et celle des minéraux argileux d'autre part ne porte pas sur la même fraction de matériau; ainsi dans certains cas, le cortège des denses peut indiquer un matériau essentiellement loessique alors que la phase argileuse (inférieure à 2μ) peut être représentative essentiellement d'un matériau différent tel ici le produit argilisé des roches du substrat. D'où la nécessité de confronter les analyses obtenues à l'aide de ces deux techniques.

PALYNOLOGIE (B. Bastin)

Introduction

Dans le but de dater la mise en place des sédiments constituant le rempart du pingo étudié, plusieurs profils ont été échantillonnés lors du dégagement de la coupe, en vue d'appliquer à ces sédiments la méthode de l'analyse pollinique. Dans deux de ces profils, localisés sur la figure 4, la richesse en spores et pollens des échantillons traités a permis d'établir un diagramme pollinique détaillé, retraçant l'évolution de la végétation durant la sédimentation des couches (8), (9) et (10), et rendant possible une datation de la mise en place de ces couches.

Techniques

La préparation des échantillons a été faite suivant la méthode que nous avons précédemment décrite, dans laquelle les échantillons sont notamment soumis à

plusieurs reprises à une agitation dans la solution de Thoulet (B. BASTIN, 1971). Nous avons cependant modifié la technique d'agitation, en remplaçant les trois agitations magnétiques (ou mécaniques), qui sont des processus lents, par deux agitations de 10" à l'aide d'un mixer dont l'hélice tourne à très grande vitesse, processus très rapide préconisé par E. JUVIGNÉ (1973). Le rendement s'est avéré excellent, nous permettant de compter en moyenne plus de 200 spores et pollens par lame analysée dans le premier profil, et plus de 500 spores et pollens par lame analysée dans le second profil.

Les diagrammes polliniques (figure 9) ont été divisés en trois parties :

- dans la partie gauche, on a représenté la courbe d'évolution du total des pollens arboréens (A.P.) et des pollens herbacés (N.A.P.).
- dans la partie centrale, on a représenté séparément les courbes des différents pollens arboréens.
- dans la partie droite, on a représenté séparément les courbes des différents pollens et spores herbacés.

Description des diagrammes polliniques (figure 9)

1. BRACKVENN, Rempart I.

Dans ce diagramme, un grand contraste existe entre d'une part les spectres polliniques des échantillons de la couche (8), dans lesquels pollens arboréens et non-arboréens ont en moyenne la même importance, et d'autre part les spectres polliniques des échantillons des couches (9) et (10), dans lesquels les pollens non-arboréens dominent très nettement. Au sein de ces deux ensembles, plusieurs phases peuvent en outre être mises en évidence :

— de 66 à 56 cm : les pollens arboréens (en moyenne 51 %) dominent légèrement, ce sont par ordre d'importance : *Pinus* (24,5 %), *Betula* (11,5 %), *Alnus* (7,5 %), *Corylus* (6 %), *Carpinus* (1 %) et *Picea* (0,5 %).

Parmi les pollens herbacés, les *Filicales* (28,5 %) prédominent nettement, les *Graminées* (7,5 %), *Botrychium* (3,5 %) et *Selaginella* (3 %) étant les autres taxons les mieux représentés.

— de 54 à 52 cm : on enregistre une diminution des pollens arboréens (34,5 %) qui se marque particulièrement par la régression des courbes de *Pinus* (15,5 %), *Betula* (5,5 %) et *Corylus* (4 %). *Alnus* (7 %) et *Carpinus* (1 %) se maintiennent, cependant qu'on enregistre la disparition de *Picea*.

L'augmentation des pourcentages des plantes herbacées est due principalement à la nette extension de *Botrychium* (13 %), de *Selaginella* (10 %), des *Cichoriées* (8 %) et des *Renonculacées* (3,5 %), qui compense la régression des *Filicales* (18,5 %).

— de 50 à 46 cm : les pollens arboréens (51,5 %) l'emportent à nouveau, *Pinus* (28 %) dominant plus nettement *Betula* (6,5 %) que dans la première phase, cependant que *Carpinus* (1,5 %) et *Picea* (1 %) atteignent leurs pourcentages les plus importants.

Toutes les plantes herbacées régressent, sauf les *Filicales* (20 %) en très légère extension.

— de 44 à 40 cm : durant cette phase de transition les arbres régressent fortement, passant de 16 % à 8 %, cette régression étant la plus nette pour *Pinus* (4,5 %), *Alnus* (2 %) et *Corylus* (1 %). *Carpinus* disparaît à 42 cm, *Picea* disparaît

à 40 cm, alors que *Betula* (5 %) semble mieux résister à la péjoration climatique dont témoigne cette phase.

La physionomie de la végétation herbacée change aussi radicalement, *Botrychium* (37,5 %) et *Selaginella* (20 %) dominant très nettement les *Filicales* (12 %), ce changement allant de pair avec un appauvrissement de la composition floristique des groupements végétaux, tant arboréens qu'herbacés.

— de 38 à 22 cm : c'est la phase la plus rigoureuse enregistrée dans la séquence étudiée. Le recul des arbres s'accroissant, seul *Pinus* (3,5 %) est encore présent dans tous les niveaux, cependant qu'*Alnus* et *Betula* deviennent sporadiques, et que *Corylus* disparaît.

Parmi les plantes herbacées, *Botrychium* (28 %) et les *Filicales* (27 %) dominent de peu *Selaginella* (20 %), les *Renonculacées* (5 %) prennent de l'extension, *Thalictrum* est régulièrement présent, cependant que les *Caryophyllacées* apparaissent en courbe continue à partir de 28 cm.

C'est au niveau 28-32 cm que se place le maximum des cendrées volcaniques, et donc l'éruption reconnue par E. JUVIGNÉ.*

— de 20 à 12 cm : une légère extension des arbres (11 %) se marque par l'augmentation des pourcentages de *Betula* (3,5 %) et d'*Alnus* (1,5 %) dont la courbe redevient continue, ainsi que par la réapparition de plusieurs pollens arboréens qui avaient pratiquement disparu dès le début de la sédimentation de la couche (9) : *Carpinus*, *Picea*, *Quercus*, *Fraxinus* et *Salix*. On note encore la première apparition de pollens d'*Ephedra* : un pollen d'*Ephedra distachya* à 20 cm, un pollen d'*Ephedra fragilis* à 12 cm.

De nouveaux changements sont enregistrés dans la flore herbacée : *Botrychium* (35 %) est en légère extension, au contraire des *Filicales* (19,5 %) et de *Selaginella* qui régresse rapidement et disparaît à 16 cm. En outre, l'extension des *Renonculacées* (20,5 %) commencée à la phase précédente devient à présent très nette.

— de 10 à 5 cm : parallèlement à un léger recul des arbres (7,5 %) est enregistrée une modification importante de la composition floristique de la végétation herbacée. Les *Renonculacées* (23,5 %) dominent à présent, et alors que *Botrychium* (9 %) et les *Filicales* (14 %) sont en recul, les *Cichoriées* (13,5 %), *Selaginella* (11,5 %), les *Graminées* (10,5 %) et les *Cypéracées* (4 %) connaissent une nouvelle extension.

2. BRACKVENN, Rempart II.

Mis à part le niveau 6 cm, pour lequel se pose un problème particulier, les spectres polliniques des échantillons de la couche (9) de ce profil sont très proches des spectres polliniques des niveaux supérieurs de la couche (9) du profil précédent.

Ils en diffèrent principalement par la présence de pollens de *Corylus* (0,3 %) dans les cinq niveaux inférieurs, par la présence sporadique de pollens d'*Ephedra fragilis*, de *Picea* et de *Carpinus*, par l'importance plus grande des *Graminées* (15,5 %), des *Cypéracées* (6 %) et de *Thalictrum* (1 %), et la moindre importance de *Botrychium* (18 %).

Nous pensons que ces différences s'expliquent par l'organisation en mosaïques des groupements végétaux de nos régions durant la dernière glaciation (B. BASTIN, 1971), et que les similitudes entre les phases correspondantes des deux diagrammes polliniques l'emportant nettement sur les différences, on peut considérer que la sédimentation de la couche (9) se fait au même moment dans les deux profils étudiés par la palynologie.

(*) E. Juvigné et B. Bastin ont poursuivi leurs recherches concernant l'âge de cette retombée. Leurs conclusions sont sous presse (*Zeitschrift für Geomorphologie*).

Dans le diagramme pollinique, nous avons encadré de traits interrompus le spectre pollinique du niveau 6 cm, pour souligner son caractère aberrant par rapport aux autres niveaux du même profil. En effet, *Pinus* y atteint 36 %, *Selaginella*, les *Filicales* et *Botrychium* y atteignent des valeurs anormalement basses, cependant qu'on enregistre la présence dans ce seul niveau de 8 % d'*Hystriosphères* et de 8 % d'un pollen tricolpé-réticulé que nous n'avons pu déterminer. Le pourcentage important d'*Hystriosphères* dans ce seul niveau témoigne sans doute du remaniement d'éléments beaucoup plus anciens, comme nous l'avions précédemment suggéré à l'occasion de l'étude palynologique d'échantillons de loess et limons würmiens de notre région (B. BASTIN, 1971).

Interprétation des diagrammes polliniques

Le fait majeur se dégageant de l'examen du diagramme BRACKVENN I est le contraste entre les spectres polliniques des échantillons de la couche (8), dans lesquels les pollens arboréens ont la même importance que les pollens herbacés, et les spectres polliniques des échantillons des couches (9) et (10), dans lesquels les pollens herbacés prédominent nettement. Ce contraste traduit une évolution de la végétation, consécutive au passage d'un climat « interstadiaire » à un climat « pléniglaciaire ».

La présence, dès le début de la phase interstadiaire, de plus de 3 % de spores de *Botrychium lunaria* et de *Selaginella selaginoides* témoigne du caractère ouvert du peuplement végétal, qui devait être proche d'une taïga claire à dominance de *Pinus* et *Betula*, avec de petits bosquets d'*Alnus* et de *Corylus*, et quelques *Carpinus* et *Picea*. Nous avons précédemment reconnu ce type de végétation à Kesselt, dans le sol cryoturbé situé au sommet des loess mésowürmiens (B. BASTIN, 1971). En effet, tout comme c'est le cas ici, durant la phase interstadiaire mise en évidence à Kesselt, la végétation forestière est dominée par *Pinus*, les principaux autres taxons étant par ordre d'importance : *Betula*, *Alnus*, *Corylus*, *Carpinus* et *Picea*. Nous rapporterons donc la période de mise en place des sédiments de la couche (8) à l'**interstade d'Arcy-Stillfried B**.

Alors qu'à Kesselt, une seule oscillation tempérée avait pu être mise en évidence par l'analyse pollinique, nous retrouvons ici la succession des deux oscillations tempérées précédemment reconnues à Arcy-sur-Cure par l'analyse pollinique de couches aurignaciennes et gravettiennes (AR. LEROI-GOURHAN, 1964), dans plusieurs grottes et abris-sous-roche du sud-ouest de la France, par l'étude sédimentologique de couches à Aurignacien II et à Périgordien à gravettes (H. LAVILLE, 1969), et plus récemment par l'étude lithostratigraphique des limons weichseliens d'Harmignies (P. HAESAERTS, 1974).

Nous rapportons l'ensemble des spectres polliniques des couches (9) et (10) au Néowürm, période au sein de laquelle se marque peut-être dans le diagramme BRACKVENN I une faible oscillation climatique de caractère plus tempéré. En effet, la phase que nous avons individualisée de 20 à 12 cm pourrait correspondre à l'**oscillation de Tursac** précédemment mise en évidence dans le sud-ouest de la France, dans des couches contenant du Périgordien supérieur à burins de Noailles (H. LAVILLE et C. THIBAUT, 1967; AR. LEROI-GOURHAN, 1968). On voit réapparaître dans cette phase du diagramme BRACKVENN I une série de pollens arboréens disparus dès le début de la sédimentation de la couche (9), notamment *Carpinus*, *Picea*, *Quercus*, *Fraxinus* et *Salix*, ce qui semble bien refléter une très légère amélioration climatique.

Ainsi que nous l'avons indiqué lors de la description du diagramme BRACKVENN II, la sédimentation de la couche (9) se fait au même moment dans les deux

profils étudiés par la palynologie, et nous rapportons donc l'ensemble du diagramme BRACKVENN II au Néowürm.

Observations écologiques

Nous avons précédemment montré que la végétation herbacée des phases froides de la dernière glaciation était caractérisée dans nos régions par la dominance des *Graminées* sur les substrats loessiques des plateaux, et par la dominance des *Cypéracées* et des *Graminées* sur les substrats limoneux des vallées (B. BASTIN, 1971).

Les diagrammes polliniques de la Brackvenn mettent en évidence un nouveau type de végétation herbacée néowürmienne, caractérisée par la dominance de *Botrychium lunaria* (en moyenne 25 % dans les couches 9 et 10), des *Filicales* (21 % dans les couches 9 et 10), et de *Selaginella selaginoides* (15 % dans les couches 9 et 10), chacun de ces taxons pouvant atteindre jusqu'à 40 % dans certains niveaux. Ce type de végétation semble se rapprocher plus des végétations de toundras que des végétations de steppes, si l'on tient compte de la présence simultanée de *Botrychium lunaria*, liée en général aux pelouses sèches, et de *Selaginella selaginoides*, espèce subarctique-subalpine que l'on trouve en général dans les pelouses humides.

Si des pourcentages importants de *Selaginella selaginoides* avaient déjà été observés précédemment dans des diagrammes polliniques de nos régions : 33 % en Campine au cours du Dryas le plus ancien (E. PAULISSEN et A. V. MUNAUT, 1969), 30 % dans la vallée de la Soor au cours du Mésowürm (B. BASTIN et coll., 1972), par contre des pourcentages de l'ordre de 40 % de *Botrychium lunaria* dans un diagramme pollinique constituent un nouveau fait d'observation se rapportant aux groupements végétaux de la dernière glaciation dans nos régions.

Étude palynologique du remplissage de la cuvette du pingo.

Dans le cadre d'une thèse de doctorat en cours de rédaction, G. WOILLARD a effectué l'analyse pollinique des couches (1), (2) et (3) constituant le remplissage de la cuvette du pingo. Le diagramme pollinique qu'elle a obtenu montre que ce remplissage a débuté au Préboréal, période reconnue dès la base de la couche (3).

Conclusion

L'étude palynologique des deux profils prélevés dans le rempart du pingo a permis de dater la mise en place du sommet de la couche (8) de l'interstade d'Arcy-Stillfried B, et la mise en place de la couche (9) et de la base de la couche (10) du début du Néowürm.

En outre, l'étude palynologique des couches de remplissage de la cuvette du pingo n'ayant pas mis en évidence de période plus ancienne que le Préboréal, on peut en conclure que la croissance du pingo s'est faite durant la seconde moitié du Néowürm, et que sa fusion s'est effectuée durant l'oscillation d'Allerød.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'ensemble de nos observations montre que le pingo étudié s'est formé sous l'effet du développement de glace de ségrégation dont la croissance a déterminé des poussées radiales profondes dirigées vers l'extérieur.

La croissance s'est faite après une phase de sédimentation (couche 10) qui a suivi l'Interstade d'Arcy-Stillfried B. La fusion était achevée au début du Préboréal.

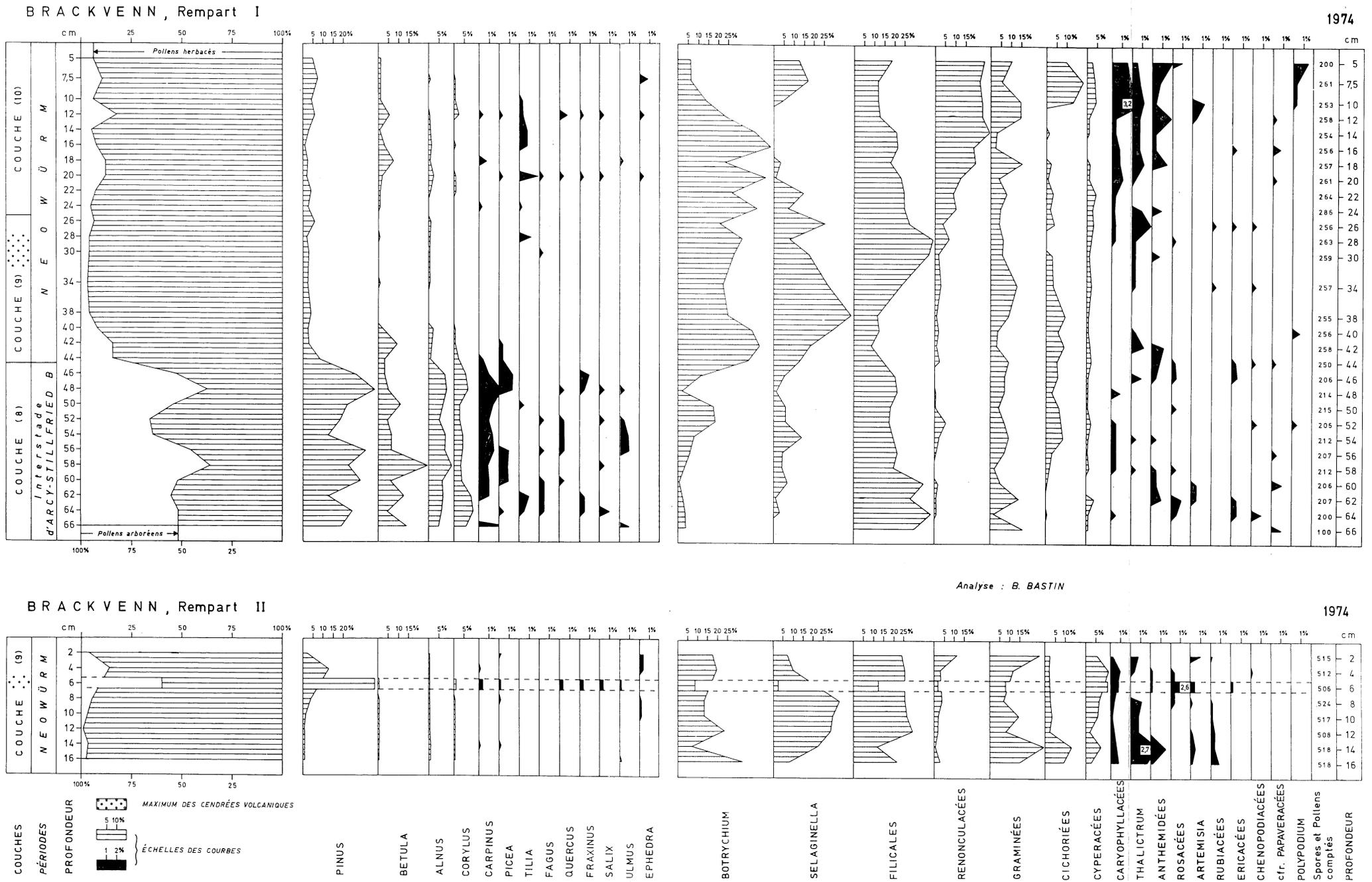


Fig. 9. — Diagrammes polliniques obtenus à l'endroit des séquences indiquées I et II sur la figure 4.

BIBLIOGRAPHIE

- BASTIN, B., 1971. — Recherches sur l'évolution du peuplement végétal en Belgique durant la glaciation de Würm. *Acta Geographica Lovaniensia*, **9**, 136 pp.
- BASTIN, B., JUVIGNÉ, E., PISSART, A. et THOREZ, J., 1972. — La vallée de la Soor (Hautes Fagnes) : compétence actuelle de la rivière, dépôts glaciaires ou périglaciaires. *Les Congrès et Colloques de l'Université de Liège*, **67**, pp. 295-321.
- BUSTAMANTE, L., 1974. — Les minéraux lourds des alluvions du bassin de la Meuse. *C. R. Acad. Sc. Paris*, ser. D, t. **278**, pp. 561-564.
- DUNOYER de SEGONZAC, G., 1970. — Les minéraux argileux dans la diagnèse. — Passage au métamorphisme. *Mém.* **29**, Service Carte Géol. Als. Lorr., 320 pp.
- ESQUEVIN, J., 1969. — Influence de la composition des illites sur leur cristallinité. *Centre Rech. Pau, S.N.A.P.*, **3**, pp. 147-154.
- GULLENTOPS, F., 1954. — Contributions à la chronologie du pléistocène et des formes du relief en Belgique. *Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain*, T. XVIII, pp. 125-252.
- HAESAERTS, P., 1974. — Séquence paléoclimatique du Pléistocène supérieur du Bassin de la Haine (Belgique). *Ann. Soc. Géol. Belg.*, T. **97**, pp. 105-137.
- JUVIGNÉ, E., 1973. — Une méthode de séparation des pollens applicable aux sédiments minéraux. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, T. **96**, pp. 253-262.
- JUVIGNÉ, E., 1973. — Un perfectionnement de la méthode de séparation des minéraux denses des loess. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, T. **97**, pp. 142-143.
- LAVILLE, H., 1969. — Le remplissage des grottes et abris du sud-ouest de la France. *Études françaises sur le Quaternaire, Suppl. Bull. AFEQ*, 8^e Congrès INQUA, Paris, pp. 77-83.
- LAVILLE, H. et THIBAUT, C., 1967. — L'oscillation climatique contemporaine du Périgordien supérieur à burins de Noailles, dans le Sud-Ouest de la France. *C. R. Acad. Sc. Paris*, Série D, T. **264**, pp. 2364-2366.
- LEROI-GOURHAN, A., 1964. — Chronologie des grottes d'Arcy-sur-Cure (Yonne) : I. Climats du Quaternaire récent. *Gallia-Préhistoire*, **7**, 1-35.
- LEROI-GOURHAN, A., 1968. — L'Abri du facteur à Tursac (Dordogne) : III. Analyse pollinique. *Gallia-Préhistoire*, **11** (1), pp. 123-131.
- MITCHELL, G. F., 1973. — Fossil pingos in Camaross Townland, Co Wexford. *Proceedings of the Royal Irish Academy*, Vol. **73**, Section B, n° 16, pp. 269-282.
- PAULISSEN, E. et MUNAUT, A. V., 1969. — Un horizon blanchâtre d'âge Bölling à Opgrimbie. *Acta Geographica Lovaniensia*, **7**, pp. 65-91.
- PISSART, A., 1963. — Les traces de pingos du Pays de Galles (Grande-Bretagne) et du plateau des Hautes-Fagnes (Belgique), *Zeit. für Geomorph.*, **7**, Heft 2, S, pp. 147-165.
- PISSART, A., 1974. — Les viviers des Hautes Fagnes sont des traces de buttes périglaciaires; mais s'agissait-il réellement de pingos? *Ann. Soc. Géol. Belg.*, T. **97**, pp. 359-381.
- SVENSSON, H., 1969. — A type of circular lakes in northernmost Norway. *Geogr. Ann.*, **51** A, pp. 1-12.
- THOREZ, J., JUVIGNÉ, E., PISSART, A. et PAEPE, R., 1975. — Le sondage de la Brackvenn (Hautes Fagnes, Belgique). Étude stratigraphique, sédimentologique et minéralogique. En préparation.
- TRAUTH, N., LUCAS, J. et SOMMER, F., 1968. — Étude des minéraux argileux du Paléogène des sondages de Caignes, Mont-Javoult, le Tillet et Ludes (Bassin de Paris). *Mém.* **59**, B.R.G.M., in Colloque sur l'Éocène, II, pp. 53-76.

