

LES PINGOS DES HAUTES FAGNES : LES PROBLÈMES DE LEUR GENÈSE (*)

par A. PISSART

(4 figures dans le texte)

RÉSUMÉ

Les pingos du plateau des Hautes Fagnes sont apparus en des endroits où une couche perméable, de sable le plus souvent, est comprise entre le limon superficiel et l'argile imperméable reposant sur le Paléozoïque quartzophylladeux. En certains endroits (Crête de Malchamps), l'injection d'eau dans les couches superficielles gelées était due à la formation d'une enceinte fermée où l'eau était mise sous pression uniquement par l'augmentation de volume accompagnant la transformation d'eau en glace. En d'autres endroits (Fagne de Steinley), la mise en charge de la nappe aquifère sur le versant a pu contribuer à donner la pression nécessaire. De toute façon, les conditions climatiques qui ont donné naissance à ces formes sont beaucoup moins rigoureuses que nous ne l'avions pensé précédemment : un permafrost profond n'était pas nécessaire, le « bed rock » imperméable le remplaçant.

INTRODUCTION

Les études se rapportant aux pingos et autres buttes dues au gel se sont multipliées ces dernières années. Ces nouvelles connaissances (**) concernant aussi bien les formes du Nord de l'Amérique que celles des régions arctiques de l'U.R.S.S. permettent d'apporter des précisions sur l'origine des traces de pingos que nous avons

(*) Je remercie M. le Professeur P. Macar et mes collègues C. Ek et G. Seret qui ont eu la bienveillance de relire et critiquer ce manuscrit.

(**) G. C. Maarleveld (1965) vient de publier à ce sujet une excellente mise au point intitulée : « Frost Mounds. A summary of the literature of the past decade ». *Med. Geol. Stichting, N. S.*, n° 17, 3-16.

ENCODÉ

16 FEB. 1989

reconnues sur le plateau des Hautes Fagnes (Pissart 1956 et 1963).

Avant d'aborder l'objet même de cet article, à savoir la genèse des pingos, rappelons brièvement quelles sont les traces de ces formes que nous retrouvons actuellement en Belgique.

Les « cicatrices » de pingos se présentent sous forme de dépressions généralement remplies de tourbe et entourées d'un rempart. Sur les surfaces planes, les dépressions ont tantôt une forme circulaire, tantôt une forme irrégulière. Sur les versants, ces cuvettes s'allongent souvent parallèlement à la ligne de plus grande pente. Leur diamètre moyen est voisin de 80 m pour les formes circulaires ; les formes allongées, par contre, ont généralement une longueur supérieure, pouvant atteindre jusqu'à 800 m. Comme les dépressions ont été postérieurement à leur apparition remplies de tourbes, ce sont évidemment les bourrelets périphériques qui sont le plus apparents. Ils peuvent atteindre quelquefois une hauteur de 5 m. La profondeur des cuvettes est variable : dans une dépression circulaire de 45 m de diamètre interne où des sondages ont été réalisés, l'épaisseur de tourbe dépasse 7,50 m.

En Belgique, ces formes n'existent que sur le plateau des Hautes Fagnes et sur le plateau de la Baraque de Fraiture, soit dans les deux cas, dans des régions de topographie calme situées à une altitude supérieure à 500 m. Les pentes des zones où se répartissent le millier de dépressions qui y ont été reconnues est toujours inférieure à 5 %.

Extérieurement, ces traces de pingos sont tout à fait semblables aux formes que nous avons découvertes au Pays de Galles près de Llangurig (Pissart, 1963). Toutefois, la localisation de ces dernières, au fond d'une ancienne vallée glaciaire, est totalement différente.

Les raisons de la localisation de ces formes n'ont pas encore été expliquées. Nous nous efforçons, ci-dessous, d'y apporter une solution.

GENÈSE DES PINGOS ACTUELS

Il est actuellement bien admis que deux types de pingos fort semblables extérieurement existent dans les régions arctiques. Apparus l'un comme l'autre par injection d'eau sous pression dans les couches supérieures du sol, ils diffèrent cependant par leur mécanisme génétique, que déterminent des conditions topogra-

phiques et climatiques dissemblables. Cette distinction, déjà proposée par Porsild en 1938, apparaît dans Schoumsky en 1955 et a été développée entre autres par Müller en 1959, Ross Mackay en 1962 et Holmes, Hopkins et Foster en 1963. Elle n'a pris toute sa valeur que lorsque le mode de formation de chacun des types et les conditions climatiques de leur apparition ont été connues. Nous résumons brièvement ci-dessous les principaux caractères différenciant ces formes.

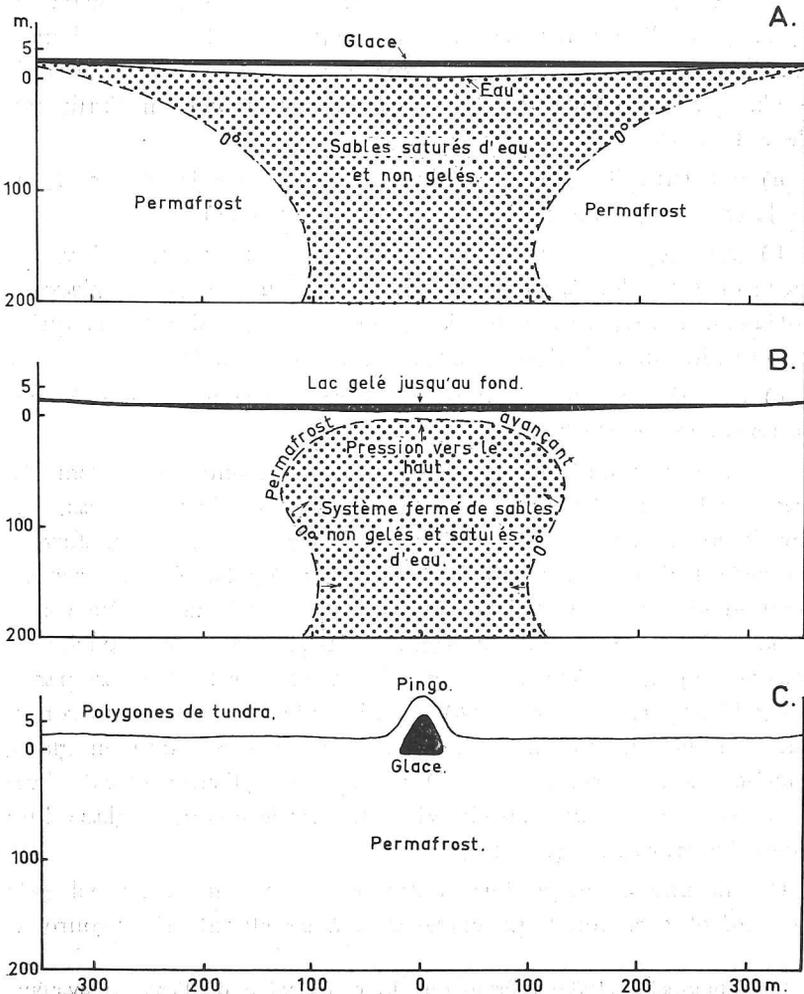


Fig. 1. — Genèse d'un pingo en système fermé : type Mackenzie.
(Extrait de Ross Mackay, 1962, p. 53)

En « système fermé » : le type Mackenzie. Le premier type de pingo est particulièrement bien représenté dans le delta du Mackenzie où il en existe près de 1400 exemplaires (J. K. Stager 1956). Selon le même auteur, 96 % de ces formes sont localisées dans les lacs peu profonds ou actuellement asséchés. Leur genèse est donc liée à cette localisation particulière ainsi que F. Müller (1959) l'a expliqué dans un travail paru en 1962 et comme l'illustre la figure 1.

Sous les lacs de l'Arctique dont la profondeur dépasse l'épaisseur de la glace d'hiver, le sous-sol n'est pas gelé et cela même si l'on se trouve dans une région à permafrost continu et profond. L'eau de ces lacs protège en effet leurs fonds de l'action du gel sous l'influence de 3 facteurs :

- a) une capacité thermique considérable due à la valeur élevée de la chaleur de fusion de la glace (79, 25 cal/cm³).
- b) une progression plus aisée du dégel que du gel dans l'eau des lacs ; en effet, lors du gel, la formation d'une couche de glace en surface isole progressivement la zone en train de geler, tandis qu'au dégel la fusion s'effectue en surface, où la glace flotte.
- c) une absorption plus grande des rayons solaires facilitée par la transparence de la masse d'eau.

Lorsque, à la suite d'une modification quelconque (soit remplissage du lac par des sédiments, soit baisse du niveau du lac, soit modification climatique) l'eau du lac est toute entière transformée en glace, le fond du lac lui-même commence à geler. Aussi le permafrost voisin progresse-t-il et vient-il conquérir la zone située sous le lac. Cette progression détermine l'apparition d'une poche de sédiments gorgés d'eau et non gelés, entourés de toutes part par le sol gelé imperméable (fig. 1B). L'augmentation de volume consécutive à la transformation de l'eau de cette enceinte en glace, engendre une pression élevée (*) qui injecte de l'eau profonde dans les couches supérieures où elle vient former le noyau de glace d'un pingo en croissance (fig. 1C).

Ce mécanisme exige bien entendu la présence d'un sol gelé profond et permanent qui correspond à un climat très rigoureux.

(*) Schoumsky (1955) affirme que la congélation de l'eau en système fermé donne naissance à des pressions énormes pouvant atteindre la valeur de 2500 atmosphères à -22°C .

La température moyenne annuelle des régions nord-américaines où ce type de pingo existe varie selon Holmes, Hopkins et Foster entre 12° et 22° F (— 11° et — 5,5°C).

En « système ouvert » : le type centre Alaska. Contrairement au précédent, le second type de pingo apparaît dans des régions présentant un relief bien marqué. Des pentes sont en effet nécessaires pour déterminer leur apparition.

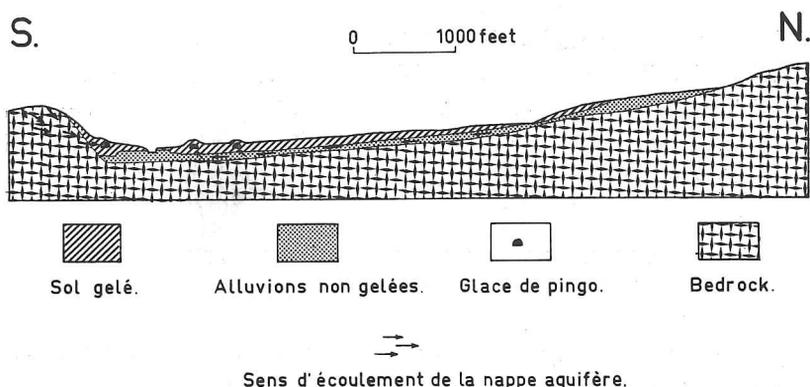


Fig. 2. — Genèse de pingos en système ouvert : type centre Alaska.
(Extrait de Holmes, Hopkins et Foster, 1963).

La figure 2, tirée de Holmes, Hopkins et Foster (1962) en montre clairement le mécanisme. Ici, la mise en charge du dispositif n'est plus occasionnée par le gel lui-même mais par une circulation d'eau souterraine, se produisant sous une couche gelée et alimentée par de l'eau superficielle descendant du versant. L'injection d'eau dans les couches supérieures gelées s'effectue en des endroits situés en contre-bas et où la couche superficielle gelée est moins résistante.

Les conditions climatiques nécessaires à l'apparition de ce type de formes sont bien moins rigoureuses que les précédentes. Les auteurs cités ci-dessus, mentionnent pour les pingos de l'intérieur de l'Alaska, des températures moyennes annuelles variant entre 22 et 28° (— 5°5 et — 2°2C).

BUTTES nées par apparition de glace de ségrégation.

Maarleveld (1965) mentionne, surtout d'après des travaux russes, l'existence d'un troisième type de buttes dues au gel dont l'origine est liée à l'apparition de lentilles de glace de ségrégation. Ces formes sont hautes seulement de quelques mètres. Leur genèse diffère totalement de celle des deux autres types. De telles lentilles de ségrégation ne proviennent pas d'injection d'eau sous pression comme dans les types précédents, mais d'une véritable succion de l'eau profonde. Elles apparaissent en des endroits où existent des parties de sol présentant une granulométrie favorable, comme par exemple une couche d'argile au milieu de sables. Ces formes ne semblent pas capables de donner naissance à des bourrelets de terre identiques à ceux que nous connaissons sur le plateau des Hautes Fagnes, aussi nous n'en reparlerons pas.

GENÈSE DES PINGOS DU PAYS DE GALLES
ET DES HAUTES FAGNES

A la lumière de cette distinction génétique, les traces de pingos que nous avons décrits au Pays de Galles (1963) s'expliquent aisément. En effet, elles sont localisées sur un épandage périglaciaire qui a ennoyé le fond d'une ancienne vallée glaciaire et correspondent exactement à la figure n° 2 (*). Ici, il ne subsiste aucun doute quant au mécanisme : les formes sont nées en système ouvert, sous des conditions climatiques sans doute moins rigoureuses que je ne l'avais admis en 1963 (**).

Sur le plateau des Hautes Fagnes, le problème est plus complexe. Si la majorité des traces de pingos sont réparties sur des pentes et peuvent être, à première vue, assimilées aux formes précédentes, il en est d'autres, localisées sur le sommet même du plateau, où une origine semblable est exclue. Il est donc impossible de faire entrer simplement ces pingos quaternaires dans la classification ci-dessus ; nous allons de ce fait étudier le problème et montrer que le méca-

(*) Du moins pour la majorité des formes groupées sur le cône de déjection que le *Nant Cae Garw* a étalé dans cette vallée glaciaire.

(**) Dans ce travail, j'ai reproduit (p. 162) l'avis de J. Corbel qui pensait qu'une température moyenne annuelle de — 10 à — 15°C était requise pour l'apparition de pingos.

nisme de leur genèse est d'un type intermédiaire à ceux que nous avons cités.

Les zones à pingos correspondraient à des couches perméables.

Il faut tout d'abord souligner que dans un cas comme dans l'autre, l'apparition de ces pingos est due à l'injection d'eau sous pression et que cette eau doit provenir d'une nappe aquifère souterraine. Ce point fondamental nous conduit à admettre l'existence, dans les zones à traces de pingos, de couches perméables sous le limon superficiel. Ces couches qui ne sont pas nécessairement très épaisses correspondent sans aucun doute le plus souvent à la présence de sables (*). Si l'existence de ces couches de sable n'a pas été démontrée directement (par sondages par exemple) dans toutes les zones à pingos, nous voudrions cependant faire ressortir que leur présence est hautement vraisemblable dans l'état actuel des connaissances géologiques.

L'étude la plus récente se rapportant aux sables des Hautes Fagnes a été publiée par P. Bourguignon en 1954. L'auteur y souligne le grand nombre de gisements de sable d'origines diverses qui existent dans cette région. A côté de sables locaux provenant de la désagrégation tertiaire et quaternaire du Paléozoïque, subsistent des placages de sables marins d'âge oligocène. Cette distinction a été obtenue par étude sédimentologique, particulièrement par la détermination des minéraux denses. Les conditions de gisement, l'épaisseur des formations, leur étendue sont cependant restées inconnues. En effet, ces sables ont été le plus souvent récoltés dans de très mauvaises excavations ou même simplement par sondages. La plupart des gisements sont insoupçonnables en surface, et il est certain que tous les placages de sable de cette région n'ont pas encore été reconnus (**).

(*) Il n'est toutefois pas exclu que le Paléozoïque fracturé ait constitué en certains endroits la roche magasin nécessaire. La question doit être posée pour le plateau de la Baraque de Fraiture où il est exclu que des dépôts secondaires ou tertiaires aient été conservés. En tout cas, le limon, malgré sa perméabilité, ne pouvait suffire en raison de sa granulométrie trop fine. Dans un tel matériel, le gel donne en effet de la glace de ségrégation par succion de l'eau, engendrant une dépression et non une pression dans la nappe aquifère.

(**) La carte pédologique, planches Reinartzof 136' A et Hoscheit 136' B, signale d'ailleurs quelques nouveaux gisements de sable, notamment à proximité de la Königlische Torf Moor.

Ces sables sont en effet masqués par une épaisseur variable de limon éolien (Bourguignon, 1953) plus ou moins soliflué et mélangé avec de « l'argile blanche » des Hautes Fagnes. Cette argile dont l'imperméabilité est bien connue provient soit du Crétacé, soit de la désagrégation du Revinien. Elle semble recouvrir la roche en place, constituée de quartzites et de phyllades reviniens déjà imperméables, d'un manteau plus imperméable encore. Le limon éolien qui surmonte l'ensemble permet quant à lui une infiltration beaucoup plus aisée des eaux.

En quelques endroits des Hautes Fagnes, les sables sont connus à l'emplacement exact des cicatrices de pingos. Ainsi, P. Bourguignon (1954 — p. 206) a extrait par sondage un échantillon de sable local dans la paroi même d'un vivier (*) près du Grand Bongard, à 1 Km du confluent de la Helle et du ruisseau du Petit-Bonheur. Il a signalé en outre des lambeaux de sables oligocènes marins à la Croix Arnold (570 m) et à Konzen (610 m) où les viviers sont importants. Sur le crête même de Malchamps, les zones à viviers sont encadrées par des gisements de sable que I. de Magnée et P. Macar (1935) ont figurés sur la carte de la répartition des lambeaux sableux qu'ils avaient étudiés précédemment.

La genèse des pingos de Malchamps

En admettant la présence de tels lambeaux sableux étendus dans toutes les zones à pingos, il est possible d'expliquer l'apparition de ceux-ci. Nous commencerons par envisager l'origine des pingos de la crête des Hautes Fagnes, crête étroite dans le sens transversal (600 m au maximum) mais très longue (14 Km) et strictement horizontale puisque sur les 4 Km 500 qui nous intéressent ici entre Baronhé et Le Rosier, son altitude varie entre 565 et 575 m. Les traces de pingos sont bien visibles et occupent la zone sommitale sur une largeur maximum de 400 m et sur une longueur totale de 3 Km 400 (2 Km à l'ENE de Malchamps et 2 Km 400 à l'WSW). La figure 3 montre pour une partie de cette zone la répartition des traces de pingos visibles sur des photos aériennes.

Sur ce sommet isolé, la formation d'un pingo en système ouvert,

(*) Nom local donné aux cicatrices de pingos du plateau des Hautes Fagnes.

c'est-à-dire par mise en charge d'une nappe aquifère se prolongeant en contre-haut sur le versant, n'a pas pu évidemment se produire. C'est en système fermé que l'injection d'eau a été réalisée : la masse d'eau comprise dans les sables dissimulés sous le limon a été mise sous pression lorsque le gel a pénétré dans ces formations. L'augmentation de volume de l'eau se transformant en glace a créé une poussée déterminant l'injection d'eau vers la surface. Ces pingos sont donc génétiquement très près de ceux du delta du Mackenzie.

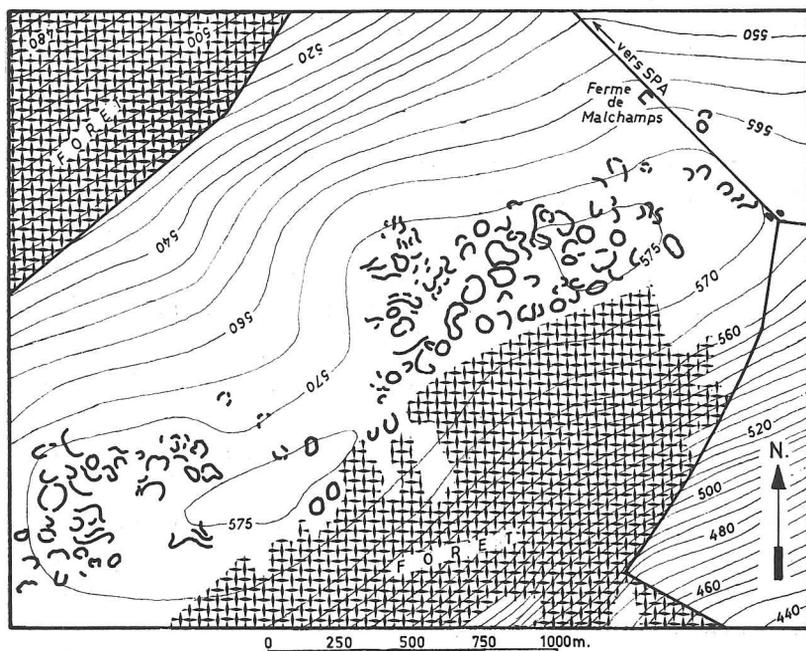


Fig. 3. — Esquisse de la répartition des traces de pingos de la crête de Malchamps, d'après photos aériennes.

Les courbes de niveau ont été dessinées d'après la carte topographique.

Ils en diffèrent cependant en ce que la création d'une enceinte où l'eau est sous pression, n'est pas due uniquement à la progression du permafrost, mais en partie du moins, à l'imperméabilité du bed-rock, imperméabilité accrue par l'argile qui le surmonte (*).

(*) C'est en fait la réalisation de l'hypothèse que Porsild avait avancée en 1938 (p. 55) pour les pingos du Delta du Mackenzie. Cet auteur a écrit alors que ces pingos « were formed by local upheaval due to expansion following the

Le climat qui leur a donné naissance pouvait, de ce fait, être bien moins sévère que celui du delta du Mackenzie.

L'importance des cicatrices actuelles en cet endroit, leur nombre et aussi leur enchevêtrement indiquent clairement que ces lentilles de glace ne se sont pas constituées en une seule phase de refroidissement. Probablement sont-elles nées successivement, les unes après les autres sur, ou au voisinage des formes les plus anciennes. Par ailleurs la quantité d'eau accumulée de la sorte a dû provenir de gels successifs, séparés par des périodes de dégel permettant l'alimentation renouvelée de la nappe aquifère des sables. Remarquons que ces périodes de dégel pourraient être insuffisantes pour faire fondre les noyaux de glace des pingos. Ceux-ci nés par arrivée d'eau au moment des grands froids dans la partie supérieure du sol pouvaient en effet subsister un certain temps après le dégel des formations meubles et longtemps après que la circulation entre la surface et la nappe perméable ne soit redevenue possible.

Genèse des pingos apparus sur des pentes

La plupart des traces de pingos du plateau des Hautes Fagnes sont réparties sur des pentes douces (— de 5 %) en contre-bas de sommets les dominant de plusieurs dizaines de mètres. Pour celles-ci, il n'est pas du tout certain que la glace d'injection qui leur a donné naissance soit née en « système fermé » comme nous venons de le voir pour les formes de Malchamps. En effet, à condition du moins que les couches perméables soient suffisamment continues, ces pingos ont pu apparaître en « système ouvert » par mise en charge de la nappe phréatique le long de la pente. Il est impossible de savoir, sans une étude détaillée de ce système aquifère, ce qui est dû dans chaque cas au « système fermé » et au « système ouvert ».

Cependant, pour les formes allongées qui existent sur les pentes l'influence d'un « système ouvert » peut être soupçonnée. Rappelons tout d'abord que ces formes, bien visibles entre autres dans la fagne de Steinley ou encore à l'Est du sommet de Hoscheit où elles ont été étudiées par Mückenhausen (1960), se présentent sous forme de deux bourrelets parallèles, allongés sur plusieurs centaines

progressive downward freezing of a body or lens of water or semi fluid mud or silt enclosed between bedrock and the frozen surface soil... ».

de mètres le long de la ligne de plus grande pente et se rejoignant souvent à leur extrémité inférieure (voir figure 4). Ces traces témoignent de pingos qui se présentaient comme des collines très allongées. Tous les intermédiaires entre celles-ci et de simples buttes arrondies devaient d'ailleurs exister ainsi que nous l'avons montré en 1963.

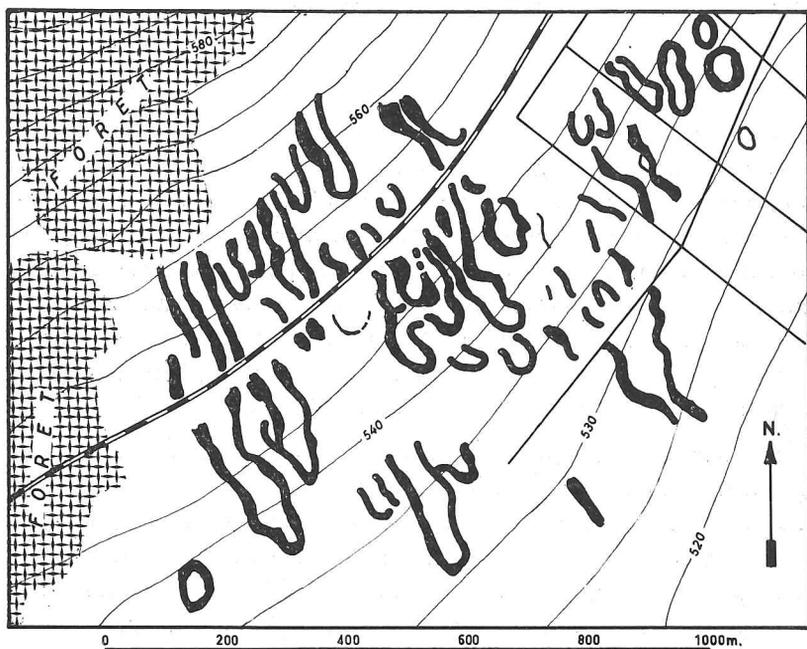


Fig. 4. — Schéma de la répartition des « murs » de pingos à l'est de Hoscheit.
La ligne de chemin de fer suit la frontière belgo-allemande.
Dessiné d'après des photos aériennes ; les courbes de niveau sont celle de la carte de Belgique au 1/15.000

Ce type particulier de pingo, où apparaît l'influence de la pente, indique sans aucun doute l'existence d'une circulation d'eau profonde sur une distance au moins aussi longue que les traces qui en ont subsisté. Une certaine mise en charge de la nappe aquifère a donc joué un rôle. La pression née de la sorte était-elle cependant suffisante pour déterminer à elle seule l'injection de l'eau dans la partie supérieure? Il est permis d'en douter.

De telles buttes allongées ont été décrites en Alaska dans la

presqu'île de Seward (juste en face du détroit de Bering) par Porsild en 1938 (*). Il les attribuait au « système ouvert » sans cependant détailler le mécanisme. Il est vraisemblable que des conduits permettant une circulation locale de l'eau dans les couches gelées aient déterminé, ainsi que le pensait Mückenhausen (1960) l'alimentation des noyaux de glace uniquement à leur partie amont, provoquant leur croissance dans cette seule direction.

CONCLUSION

1. L'origine des pingos des Hautes Fagnes serait due à la mise sous pression de l'eau contenue dans des couches perméables et ce, par deux mécanismes différents : le premier, dû uniquement à la congélation de l'eau en « système fermé », se rapproche de celui qui donne naissance aux pingos du delta du Mackenzie. Il a été le plus important. Sur les pentes, ce mécanisme a été aidé par la mise en charge de la nappe aquifère sur le versant, processus principal de la formation des pingos du centre de l'Alaska.

2. Pour apparaître, ces pingos ont exigé la présence d'une couche perméable, de sable probablement, coincée entre le limon superficiel assez perméable et le bed rock souvent imperméable et recouvert d'argile. Ces conditions géologiques particulières expliqueraient la répartition à première vue incompréhensible de ces pingos sur le haut plateau et peut être aussi leur rareté (**) en Europe occidentale. La présence de ces sables mérité d'être vérifiée par sondage, étude que nous projetons de réaliser aussitôt que possible.

3. Les pingos des Hautes Fagnes sont vraisemblablement apparus sous un climat beaucoup moins froid que nous ne l'avons pensé tout

(*) Étant donné que c'est la seule description que nous ayons jamais trouvée de formes identiques à celles qui ont dû façonner les longs « murs » des Hautes Fagnes, nous en donnons ci-dessous les éléments essentiels (p. 47 et 48) : les pingos formés par pression hydraulique sont toujours « sur des pentes dans des sols sableux ou d'autres types de sols perméables. Ces buttes ne sont jamais très grandes. Beaucoup sont allongées ; quelques unes ont l'apparence d'une crête et peuvent à première vue ressembler à une moraine ou un esker... ». « Ces buttes parallèles à la pente générale ont été observées en coupe en plusieurs endroits grâce à des travaux miniers. Par-tout, elles étaient formées d'un noyau de glace reposant directement au sommet des graviers aurifères ».

(**) Du moins pour les « cicatrices » présentant un rempart bien marqué.

d'abord. Sans doute une température moyenne annuelle comprise entre 0 et -5° était-elle suffisante. En tout cas, un permafrost continu n'était certainement pas nécessaire. Des indications sur ce climat seront obtenues en étudiant la profondeur à laquelle se trouve la couche perméable existant par exemple sur la crête de Malchamps ; nous connaissons ainsi la profondeur à laquelle le gel a dû se propager pour créer la pression initiatrice du phénomène.

*Laboratoire de Géographie Physique
de l'Université de Liège.*

BIBLIOGRAPHIE

- BOURGUIGNON, P., 1953. — Associations minéralogiques des limons et argiles des Hautes Fagnes. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 77, B 39-59.
- BOURGUIGNON, P., 1954. — Les sables des Hautes Fagnes. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 77, B 201-241.
- DE MAGNEE, I. et MACAR P., 1935. — Données nouvelles sur les sables des Hautes Fagnes. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 59, B 263-288.
- HOLMES, G. W., HOPKINS, D. M. and FOSTER, H. L., 1963. — Distribution and age of pingos of interior Alaska. *International conférence on permafrost. Session 2 B. Massive Ground Ice. Purdue University, November 1963.*
- HOLMES, G. W., HOPKINS, D. M. and FOSTER, H. L., 1963. — Pingos in central Alaska. *Geol. Soc. Amer., Spec. Paper*, 73.
- MAARLEVELD, G. C., 1965. — Frost mounds. A summary of the literature of the past decade. *Med. Geol. Stichting, N. S.*, 17, 3-16.
- MÜCKENHAUSEN, E., 1960. — Eine besondere Art von Pingos am Hohen Venn/Eifel. *Éisz. und Gegenw.*, 11, 5-11.
- MÜLLER, F., 1959. — Beobachtung über Pingos. *Medd. om Gronland*, 153, 3.
- PISSART, A., 1956. — L'origine périglaciaire des viviers des Hautes Fagnes. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 79, B 119-131.
- PISSART, A., 1963. — Les traces de « pingos » du Pays de Galles (Grande Bretagne) et du plateau des Hautes Fagnes (Belgique). *Zeitschr. für Geomorphologie*, 7, 147-165.
- PORSILD, A. E., 1938. — Earth mounds in unglaciated Arctic Northwestern America. — *Geogr. Review*, 28, 46-58.
- ROSS MACKAY, J., 1962. — Pingos of the pleistocene Mackenzie River Delta area. *Geogr. Bull.*, 18, 21-63.
- SCHOUMSKY, P. A., 1955. — Principes de glaciologie structurale. Traduction par J. PIETRESSON DE SAINT AUBIN et A. BAUER. *Ann. Centre Études et Doc. paléont.*, 22, Oct. 57, 309 p., Gap.
- STAGER, J. K., 1956. — Progress report on the analysis of the characteristics and distribution of pingos, east of the Mackenzie delta. *Canadian geogr.*, 7, 13-20.