

A. PISSART*, S. HARRIS**, A. PRICK***
VAN VLIET-LANOE****

Liège-Calgary-Lille

LA SIGNIFICATION PALEOCLIMATIQUE DES LITHALSES (PALSES MINÉRALES)

Abstract

We propose to use the term lithalsa introduced into the English literature by Harris (1993), to designate all the permafrost mounds lacking a peat cover that are formed by ice segregation formation in the soil (i.e. by cryosuction without any hydrostatic pressure). These mounds appear as islands of permafrost in the zone of discontinuous permafrost. "Lithalsa" would then designate the "palsa like frost mounds in mineral soil" described by WRAMNER (1972 a) in Scandinavia, the "battes minérales cryogènes" of PAYETTE, SAMSON, LAGAREC (1976), the "palses minérales" of DIONNE (1978) and, of course, the "lithalsas" described by HARRIS (1993) in the Yukon Territory. Using "lithalsa" for these forms allows then to avoid the term "palsa", that several authors would like to see strictly used for mounds with a cover of peat, considering its first use in Scandinavia. The resemblance between the terms "palsa" and "lithalsa" suggests the perfect similarity in origin and the likeness in form of these permafrost mounds. The ice inside palsas is segregation ice. Immediately below the active layer, palsas may contain an appreciable amount of aggradational ice as shown by ALLARD, CARON, BEGIN (1996). WASHBURN (1983a, b), has emphasized the importance of this type of ice in the palsas he described from continuous permafrost areas, although he did not name it. The study of the distribution of the lithalsas of Hudsonie demonstrated that these landforms are well developed at the northern limit of discontinuous permafrost, where the mean annual air temperature is -6°C (summer: $+9^{\circ}\text{C}$; winter: -24°C).

The mounds formed in the Late Dryas on the plateau of the Hautes Fagnes in Belgium appeared under very similar climatic conditions, according to the data of Isarin doctoral thesis (1997).

A lithalsa is described from near Whitehorse, Yukon Territory. It is covered by lacustrine sediments of very low density that act as an insulating layer. These sediments have played a role partially similar to the one of the peat and allowed the birth of this lithalsa whereas the mean annual air temperature there is only -2°C . It is therefore necessary to distinguish these two types of lithalsas if one wishes to interpret remnants of such mounds for paleoclimatic reconstruction.

Résumé des auteurs

Nous proposons d'utiliser le terme de lithalse, équivalent français du terme anglais lithalsa créé par S. HARRIS en 1993 pour désigner toutes les buttes cryogènes sans couverture de tourbe qui sont dues à l'apparition dans le sol de glace de ségrégation (donc formée par cryosuccion en l'absence de pression hydrostatique) et qui constituent des îlots de per gélisol dans la zone du pergélisol discontinu.

*Laboratoire de Géographie physique, Université de Liège, Sart Tilman, B11, 4000 Liège, Belgique.

**Department of Geography, University of Calgary, Alberta T2L 1N5, Canada.

***Chargée de Recherche du Fonds National de la Recherche Scientifique.

****URA 719 CNRS, Université des Sciences et Techniques de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France.

Le terme lithalse désignerait ainsi les "palsa like frost mounds in mineral soil" que WRAMNER (1972) a décrit en Scandinavie, les "buttes minérales cryogènes" de PAYETTE, SAMSON, LAGAREC (1976), les "palses minérales" de DIONNE (1978) et aussi évidemment, les "lithalsas" décrits au Yukon par S. HARRIS (1993). Le terme lithalse permet pour ces formes d'éviter le mot palsa qui, pour plusieurs auteurs, doit être réservé, vu son usage premier en Scandinavie, à des buttes couvertes de tourbe. La ressemblance du terme lithalse avec le mot palse suggère toutefois la similitude complète d'origine et la ressemblance qui existe entre ces deux types de buttes cryogènes. La glace comprise dans les palses est de la glace de ségrégation. Immédiatement sous la couche active, il peut y avoir une quantité non négligeable de glace d'accroissement (aggradational ice) comme l'ont montré ALLARD, CARON, BEGIN (1996). Washburn (1983a et b) avait déjà souligné l'importance de cette glace (sans toutefois la nommer) pour des palses apparues en pergélisol continu.

L'étude de la répartition des lithalses de Hudsonie a montré que ces formes sont bien développées à la limite septentrionale du pergélisol discontinu où la température moyenne annuelle est de -6°C (été: $+9^{\circ}\text{C}$, hiver: -24°C). Les formes qui sont apparues au Dernier Dryas sur le plateau des Hautes Fagnes en Belgique ont grandi sous des conditions climatiques très semblables d'après les données de la thèse d'ISARIN (1997).

Une lithalse est décrite au Yukon non loin de Whitehorse. Elle est recouverte de sédiments lacustres dont la densité est très faible et qui font office d'isolant thermique. Ces sédiments ont joué un rôle au moins partiellement équivalent à celui de la tourbe et ont permis la croissance de cette lithalse alors que la température moyenne annuelle est seulement de -2°C . Il y a lieu de distinguer les deux types de lithalses si l'on veut utiliser les traces de ces formes pour des reconstructions paléoclimatiques.

TERMINOLOGIE

L'existence de buttes cryogènes sans tourbe, identiques aux palses et qui sont dues comme elles à l'apparition de glace de ségrégation, a seulement été clairement reconnue dans les années 1970. L'excellent travail de WRAMNER (1972) intitulé "Palsa like formation in mineral soil" a été le premier article uniquement consacré à ce type de forme périglaciaire. Ces buttes cryogéniques minérales ont été dénommées: "palsa like frost mounds in pure mineral soil" (WRAMNER, 1972), "monticules de boursoufflement de migration" (EVSEEV, 1973), "buttes minérales cryogènes" (PAYETTE, SAMSON, LAGAREC, 1976), "pure mineral soil palsa with no peat, purely minerogenic palsa with no peat" (AHMAN, 1977), "palse minérale" (DIONNE, 1978; PISSART et GANGLOFF, 1984), "cryogenic mounds" (LAGAREC, 1982; WEIDONG, ALLARD, 1995), "mineral permafrost mounds" (ALLARD, SEGUIN, LEVESQUE, 1986) et "palsas like mounds" et "lithalsas" (HARRIS, 1993). Nous proposons ici d'utiliser pour toutes ces formes la traduction en français de "lithalsa" soit "lithalse", afin de sortir d'une discussion terminologique stérile.

L'utilisation de "lithalse" permet de réserver comme le propose WASHBURN (1983) le terme de "palse" pour des buttes recouvertes de tourbe. Le même point de vue a été défendu par la suite par SEPPÄLÄ (1986) et par NELSON, HINKEL, OUTCALT (1992) qui ont insisté sur le fait qu'à l'origine le terme de "palse" était attribué à des formes recouvertes de tourbe. Il est pour eux inacceptable de l'utiliser pour désigner des formes purement minérales qui en sont totalement dépourvues. Et cependant les palses recouvertes de tourbe et les buttes qui en sont dépourvues ont une origine

150. identique, des dimensions absolument comparables et existent les unes à côté des autres comme cela a été souligné par les auteurs qui les ont étudiées en Scandinavie et en Hudsonie (WRAMNER, 1972; AHMAN, 1977; DIONNE, 1978).

HISTORIQUE DES CONNAISSANCES LES PALSES AVEC UN NOYAU MINÉRAL

Au départ on croyait que la glace responsable du soulèvement des palses était uniquement localisée dans la tourbe. Il est apparu progressivement à la fin des années 60 et dans les années 70 qu'un noyau minéral gelé existait dans la majorité des cas. Très tôt, G. LUNDQVIST (1953) en avait mentionné des exemples au nord de la Suède tandis que RUUHIJARVI (1960) en avait décrit d'autres en Finlande et dans des régions voisines. H. SVENSSON en 1964 écrit aussi un article intitulé "Structural observations in the minerogenic core of a pals". P. WRAMNER (1967) souligne que le soulèvement des palses est principalement dû au soulèvement par le gel qui se produit dans le sol minéral (des silts fins) des palses. FORSGREN (1968) avait séparé les palses en deux catégories: les "minerogenic palsas" dont le noyau est constitué principalement de sol minéral gelé et les palses dont la plus grande partie du noyau est faite de tourbe gelée (p. 118). Il précisait cependant que les lentilles et les veines de glace étaient plus développées dans la tourbe que dans le sol minéral et que, en conséquence, la plus grande partie de la hauteur des palses devait être attribuée au soulèvement par le gel qui s'était produit dans la tourbe (p. 120). Cependant, J. LUNDQVIST (1969) montre clairement par le schéma d'une palse typique (Fig. 1, p. 206) que certains pensaient encore à ce moment que la glace devait exister uniquement dans la tourbe. Il écrivait toutefois: "In exceptional cases, the palsas also consist of mineral soil." ZOLTAI et TARNOCAI (1971) soulignent aussi que les lentilles de glace sont plus importantes dans l'argile gelée que dans la tourbe. BROWN (1973, p. 27) décrit les palses comme des buttes de tourbe recouvrant un sol minéral gelé dans lequel se trouvent principalement les lentilles de glace. Les descriptions données par SPOLANSKAYA and EVSEYEV (1973) montrent exactement la même chose. AHMAN (1977) défend la même idée en précisant que la première condition pour la formation des palses est l'existence de formations minérales favorables à l'apparition de glace de ségrégation (p. 144). En 1986 enfin, ALLARD, SEGUIN et LEVESQUE précisent que "almost all palsas have a mineral core within which most of the segregation and heaving have taken place" (p. 285), opinion qui est maintenant généralement acceptée.

LES LITHALSES

En 1972 (a), avec le travail de Wramner sont apparus dans la littérature les "palsa like formation in mineral soil" qui sont donc des palses sans

aucun dépôt de tourbe en surface. LAGAREC qui les avait déjà signalées en 1973, écrit en 1976, après une description détaillée des palses de la région de Chimo au Canada: "il est souvent impossible, sinon fallacieux de définir la limite entre une palse minérotrophe et une butte constituée de matériel minéral et résultant du gonflement par le gel... les deux peuvent être voisines... Sur le plan génétique il s'agit vraisemblablement des résultats des mêmes phénomènes." La même opinion se retrouve dans PAYETTE, SAMSOM, LAGAREC (1976). WRAMNER (1972A) comme AHMAN (1977, p. 131) ont montré de la même manière l'existence de toutes les transitions entre les "pure peat palsa," les "minerogenic palsa with a cover of peat" et les "purely minerogenic palsas with no peat cover", formes que nous dénommons ici "lithalsas". Il établissait ainsi qu'il s'agissait bien d'une même famille de formes, ainsi que cela a été confirmé par la suite (ALLARD, SEGUIN, LEVESQUE, 1986).

Une confusion terminologique en ce qui concerne ces formes s'est éternisée parce que pour certains les termes "palse minérale" ou "mineral palsa" représentaient aussi bien des palses sans tourbe que des palses avec une faible couverture de tourbe (HIRAKAWA, 1986; WORSLEY, GURNEY, COLLINS, 1995). Rappelons aussi que Washburn en 1983 avait proposé d'utiliser "mineral palsa" pour désigner des formes dont le volume du sol minéral dépassait le volume de tourbe. Enfin ajoutons que la confusion a été aussi entretenue par le fait que "palse minérale" en français était comprise parfois comme l'équivalent de "minerogenic palsa" en anglais.

LE PROCESSUS DE FORMATION DES PALSES

Les mécanismes de formation des palses et des lithalses étant identiques le terme "palse minérale" proposé par DIONNE en 1978 avait paru autrefois excellent pour désigner les lithalses car il soulignait leur similitude d'origine. Le problème essentiel qui se posait dans les années 70 pour les traces de buttes cryogènes fossiles comme celles des Hautes Fagnes en Belgique était de savoir s'il s'agissait de palses ou de pingos, autrement dit de reconnaître les mécanismes responsables de leur apparition. L'étude de ces formes fossiles avait d'ailleurs conduit très tôt à les considérer comme des traces de palses, la présence ou l'absence de tourbe paraissant un problème secondaire. La découverte en 1980 de tourbe dans un des remparts d'une de ces formes a montré d'ailleurs qu'à côté de buttes sans tourbe qui étaient certainement la majorité, ont existé des buttes recouvertes de tourbe qui sans restriction, méritent le nom de palses.

LA GLACE CONTENUE DANS LES PALSES ET LES LITHALSES

Palses et lithalses sont donc des buttes qui sont apparues par l'accumulation dans le sol de glace de ségrégation. C'est seulement après les

travaux de TABER (1929, 1930) expliquant la formation de cette glace qu'il a été possible de comprendre comment ces buttes cryogènes se forment. Taber avait démontré comment apparaissait cette glace dans les sols minéraux et WRAMNER (1972 b) s'est soucié pour expliquer les palses de démontrer que la glace de ségrégation pouvait apparaître aussi dans la tourbe. Il y a mesuré la pression résultant du soulèvement et la vitesse de soulèvement. Il avait le souci de prouver que le processus de formation était le même dans la tourbe et dans les silts.

Il est apparu plus récemment que l'on peut distinguer au sein des palses et des lithalses deux types de glace de ségrégation, l'une qui s'est formée à la base du pergélisol et l'autre qui s'est formée au sommet de celui-ci. Cette dernière glace porte le nom de glace d'accroissement. Ce terme est une traduction de "aggradational ice" proposée par HARRIS (HARRIS *et al.*, 1988) tandis que plus récemment VAN EVERDINGEN (1998) mentionne aussi en français le terme glace d'agradation. Cette glace est maintenant bien connue (MACKAY, 1972; PISSART, 1975; CHENG, 1983; BURN, 1988).

Comme l'indiquait SEPPÄLÄ (1988, p. 248), les palses sont normalement formées par congélation de haut en bas depuis la surface du sol. Il entendait certainement par là que l'accumulation de glace responsable de la butte apparaît principalement à la base du pergélisol. Ce processus ne peut agir dans des régions de pergélisol profond où la pression interdirait la formation de glace et la rigidité du sol gelé ne permettrait pas l'apparition de buttes étroitement localisées. WASHBURN (1983a) en décrivant des palses dans des régions de pergélisol continu (déjà décrites entre autres par AKERMAN, 1982) a indiqué que dans cet environnement les palses s'étaient formées différemment, "at an active-layer permafrost contact zone", ce qui implique (lorsqu'il s'agit de glace de ségrégation) qu'il parlait de glace d'accroissement (se formant par le gel de bas en haut, depuis le sommet du pergélisol).

Récemment, ALLARD, CARON, BEGIN (1996) ont mis en évidence l'existence de semblable glace d'accroissement sur un "permafrost plateau" du Nouveau Québec et montré que cette glace n'était pas négligeable dans l'élévation de ce plateau puisqu'ils lui attribuent 15% (soit 85 cm) de ses 5,60 m d'élévation (p. 224). Il s'agit là d'une observation fondamentale qui ne semble pas avoir été comprise en ce qui concerne le processus de formation des palses. L'existence d'un tel enrichissement en glace avait déjà été observé au sommet des palses mais son mode de formation et sa signification n'avaient pas été soulignés (AHMAN, 1976; DEVER *et al.*, 1984; SEPPÄLÄ, 1988; FORTIER *et al.*, 1991). HARRIS en 1993 avait aussi indiqué que de l'humidité d'origine météorique pénètre dans les palses par le sommet. Le processus de formation des palses n'est de ce fait pas complètement différent dans les zones de pergélisol continu et discontinu puisque des deux côtés un des phénomènes qui en est responsable est le même.

L'épaisseur des lentilles de glace de ségrégation observées dans les paises varie d'une fraction de mm à plus de 40 cm (valeur donnée par AHMAN, 1976) La meilleure description de la glace présente dans ces buttes a été donnée par ALLARD, SEGUIN, LEVESQUE (1996) pour une butte semblable aux milliers de paises et "peat plateau" formés dans le subarctique pendant l'Holocène dans des silts argileux. Ces auteurs ont montré que, sous la couche active, la quantité de glace était très importante du fait de l'apparition de glace d'accroissement (50 à 80% en volume) sur une épaisseur moyenne de 1,5 m, qu'elle était très réduite ensuite (10 à 30% en volume) sur une épaisseur de 1,5 m, puis que les lentilles de glace de ségrégation devenaient plus importantes (50 à 80% en volume) et de plus en plus épaisses avec la profondeur. Les lentilles peuvent dépasser 20 cm d'épaisseur près de la base du pergélisol à près de 10 m de profondeur.

Le modèle développé par WEIDONG et ALLARD (1995) qui ne prend pas en compte la glace d'accroissement, indique d'ailleurs que la concentration de glace doit être plus importante près de la base du pergélisol.

CLIMAT ET APPARITION DES PALSES MINERALES

AHMAN (1976, p. 30) avait déjà souligné que plus au nord ou à une altitude plus élevée, la couverture de tourbe nécessaire pour protéger le noyau gelé de la fusion pouvait être plus mince de telle sorte que, à terme, une couverture de tourbe ne devenant plus nécessaire, ce sont de "pure minerogenic palsas" ("lithalsas") qui apparaîtront. L'exigence, pour que ce type de forme se développe et continue à exister, est alors un climat sévère pour compenser la couche de tourbe manquante.

La même année, PAYETTE, SAMSON, LAGAREC (1976) montrent qu'il en est bien ainsi au Québec. Ils écrivent en effet (p. 219) que le complexe de lithalsas ("cryogenic mineral mound complex") est ordinairement localisé dans la partie septentrionale de la zone de passage forêt/toundra. Une carte de la répartition de ces formes le long de la baie d'Hudson confirme cette répartition. DIONNE (1978) précise et étend la cartographie; il souligne que les facteurs favorables à l'apparition des paises et lithalses dans la zone côtière de la Baie d'Hudson est un sol approprié (les dépôts silteux) et un climat estival légèrement plus rigoureux que dans les hautes terres en raison de l'influence de la mer. LAGAREC en 1982 donne aussi une carte des lithalses (mineral cryogenic mounds) dans le même secteur confirmant les publications déjà citées. Il communique à un des auteurs (A. PISSART) en août 1986, une carte non publiée donnant la distribution schématique des paises et lithalses et pour laquelle il conclut au rôle important des étés frais et secs du fait de l'influence déterminante jouée par les masses d'air arctiques".

SEPPÄLÄ (1988) a présenté par ailleurs un modèle général (fig. 11. 12) figurant l'épaisseur maximum et minimum de tourbe nécessaire pour la formation de palses. Dans ce modèle, l'épaisseur minimum devient nulle pour une température moyenne annuelle de -6°C , ce qui signifie que pour cette température des lithalses peuvent apparaître. Malheureusement les données sur lesquelles s'appuient ce modèle ne sont pas fournies.

Au total, il est clair que les lithalses apparaissent à la bordure septentrionale de la zone où se localisent les palses, non loin de la limite du pergélisol continu. Les données climatiques de Kangiqsualujjuaq près de la Baie d'Ungava au Canada que WEIDONG et ALLARD (1995) ont pris en compte pour établir un modèle mathématique calculant l'évolution d'un butte cryogène sans y introduire de tourbe paraissent constituer, puisqu'elles ont été choisies, des valeurs caractéristiques des conditions climatiques d'apparition des palses minérales. Le site se trouve effectivement à la limite septentrionale de la zone de pergélisol discontinu. Les valeurs retenues qui ont été mesurées pendant la période 1980–1990 sont les suivantes : température moyenne annuelle de l'air variant entre -4.4°C et -6.7°C avec une moyenne de -5.8°C ; index moyen de gel de l'air, 3193 degrés-jours et index moyen de dégel, 1079 degrés-jours; température moyenne de janvier, -22°C ; température moyenne de juillet environ, 9°C ; précipitations totales, environ 400 mm.

LES TRACES DES LITHALSES DES HAUTES FAGNES (BELGIQUE)

Il est intéressant de noter ici que les indications paléoclimatiques dont on dispose maintenant pour rendre compte de l'apparition des lithalses dont on retrouve les traces sur le plateau des Hautes Fagnes en Belgique, conduisent à des données climatiques tout à fait comparables.

Rappelons tout d'abord que ces centaines de dépressions fermées qui sont réparties sur le sommet de la Belgique à une altitude voisine de 600 m ont tout d'abord été interprétées comme des traces de pingos (PISSART, 1956). En étudiant les mécanismes génétiques qui leur ont donné naissance, elles ont été par la suite reconnues comme des traces de palses (PISSART, 1974, 1985). Des fouilles (PISSART et JUVIGNÉ, 1980) ont établi comment se sont formés les remparts et ont prouvé que ces formes sont apparues pendant le Dernier Dryas.

Une thèse présentée à la fin de l'année 1997 par R. ISARIN à la Vrije Universiteit d'Amsterdam a eu pour objet la reconstitution des conditions climatiques qui existaient au cours du Dernier Dryas dans l'Europe du Nord-Ouest. Considérant toutes les données susceptibles de fournir des indications paléoclimatiques, l'auteur a présenté des cartes des températures moyennes annuelles, ainsi que des cartes des températures des mois les plus froids et les plus chauds pour cette période. Les données sont

ramenées à leur valeur au niveau de la mer et pour obtenir les valeurs réelles qui ont existé au sommet des Hautes Fagnes, nous y avons apporté une correction de $0,6^{\circ}\text{C}$ par 100 m, valeur prescrite par ISARIN lui-même. Étant donné que le plateau des Hautes Fagnes culmine à près de 700 m, et que les lithalses sont apparues principalement entre 500 m et le sommet, une correction de $-3,6^{\circ}\text{C}$ a été apportée aux températures figurant sur les cartes de cette thèse. Les valeurs pour le plateau des Hautes Fagnes deviennent ainsi: température moyenne annuelle: $-5,6^{\circ}\text{C}$, température d'hiver: $-19,6^{\circ}\text{C}$; température d'été: $+9,4^{\circ}\text{C}$.

Il est tout à fait remarquable de constater que les valeurs de température données par R. ISARIN sont aussi proches des valeurs observées dans la partie de la Hudsonie où les lithalses sont les plus nombreuses et actuellement les mieux connues. Les traces de lithalses paraissent ainsi être des formes susceptibles de fournir des indications paléoclimatiques excellentes.

UNE LITHALSE DIFFÉRENTE AU YUKON

Au cours d'un voyage réalisé en 1997 au Yukon, des coupes dans une lithalse boisée ont été observées près de Fox Lake (61°N , 135°O , Yukon) à proximité immédiate de l'endroit où l'un d'entre nous (S. HARRIS) avait décrit en 1993 des "palsas like mounds" en proposant pour la première fois le terme de "lithalsas". La végétation est actuellement à l'emplacement de la lithalse dont il va être question, une taiga continentale qui empêche la déflation de la neige. Les précipitations sont faibles, de l'ordre de 270 mm par an selon les stations les plus proches. La coupe dont il va être question a été observée dans une lithalse en fusion située à une centaine de mètres du site étudié par S. Harris, mais sur la rive droite à proximité immédiate, de l'embouchure du lac Fox. Elle est entièrement boisée mais la fusion thermokarstique de cette butte y entraîne l'affaissement et l'inondation du centre (photo 1). L'environnement de cette lithalse est moins froid que les sites où se localisent les lithalses du Québec dont nous avons parlé plus haut puisque la température moyenne annuelle y est estimée être de -2°C . Cette observation soulève donc la question de savoir si les indications climatiques que nous avons mentionnées comme correspondant à la distribution des lithalses est valable pour toutes les formes ou doivent être remises en question.

L'examen des coupes observées dans la dépression thermokarstique apparue au milieu de cette forme montre que cette lithalse est différente des formes décrites en Hudsonie. Sous une couche de 23 cm de mull calcaire, affleurerait sur environ 30 cm un matériau blanchâtre qui, du fait de sa cohérence, restait en porte à faux. Ce matériau très léger (densité apparente sèche: 0.59) est actuellement sec, in situ. Un échantillon de ce

matériau prélevé à 45 cm de profondeur a été étudié en lame mince par l'un de nous (B.V.V.). Il est apparu comme une craie lacustre chargée de nombreuses diatomées (une vingtaine d'espèces), des chrysophycées, des spicules d'éponge, du pollen de conifères et des framboïdes de pyrite. Il incorpore des fragments de coquilles gélifractées et des débris végétaux peu humifiés. Cette craie lacustre naturellement très poreuse est affectée par une structure lamellaire fine attestant d'une ségrégation de glace saisonnière. Il s'agit donc d'un dépôt lacustre anoxique.

Le même matériel lacustre, avec de nombreuses coquilles, mais beaucoup moins consolidé se poursuivait ensuite sur une épaisseur de 60 cm avant d'arriver à un horizon de glace formé de cristaux de 5 à 7 cm de dimension (selon la section oblique observée) au sein desquels apparaissaient comme isolés des blocs polyédriques de matière minérale identique à la matière surincombante (photo 2). Cette glace était de la glace d'accroissement apparue progressivement au sommet de la lithalse entre autres à la suite du boisement de la surface qui a entraîné un refroidissement du sol et une diminution d'épaisseur de la couche active.

Le phénomène essentiel que nous voulons souligner ici est l'existence au sommet de cette lithalse de cette couche peu dense et poreuse lacustre qui

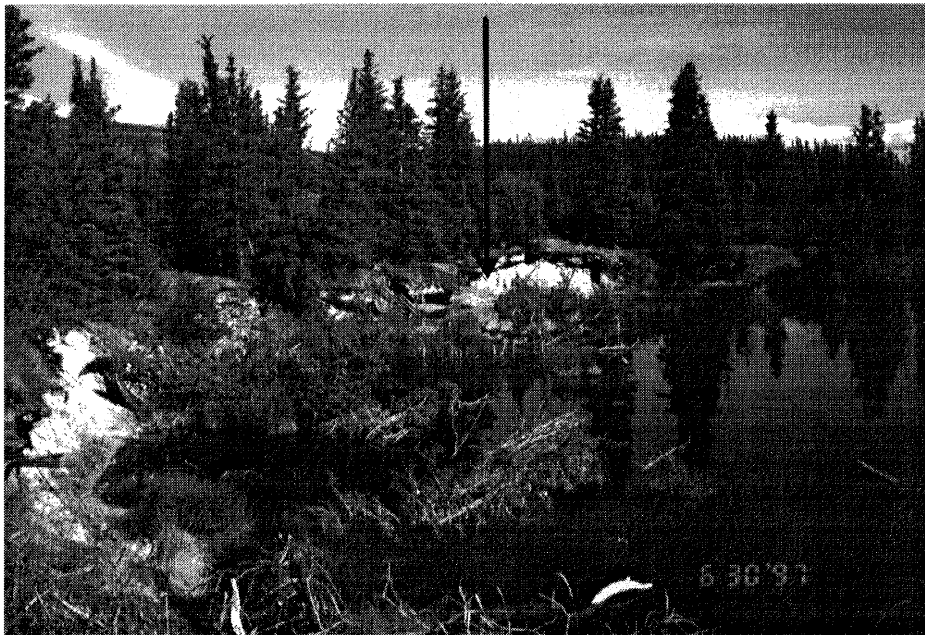


Photo 1. Vue de la dépression thermokarstique apparue au centre de la lithalse étudiée à proximité de Fox Lake (Yukon)

La photo 2 a été prise à l'emplacement de la flèche

est très isolante et qui joue ainsi une partie du rôle qu'attribue WASHBURN (1979, p. 177) à la tourbe dans la formation des palses. Soulignons que WASHBURN indique dans le même texte que la conductivité thermique de celle-ci est plus grande gelée que dégelée et que ce facteur doit sans doute aussi intervenir dans la formation des palses. Cette caractéristique n'est pas seulement valable pour la tourbe; elle est liée aux propriétés physiques de la glace et de l'eau. Rappelons que, à 0°C, la chaleur spécifique de la glace est seulement la moitié de celle de l'eau (2.060 J.kg⁻¹ pour la glace et 4216 J. kg⁻¹ pour l'eau selon LLIBOUTRY, 1964, p. 29) et que, à 0°C également, la conductivité thermique de la glace est près de 4 fois celle de l'eau (2,1 pour la glace et 0,58 v. (s.m.K)⁻¹ selon FRANKS, 1983). La conductivité est ainsi plus élevée pour tout sédiment gelé, organique ou minéral, que lorsqu'il est dégelé. Le rapport entre les valeurs de conductivité thermique de sédiments gelés et dégelés ne sont guère différents pour de la tourbe (avec 90% d'eau), des sable fins saturés ou de



Photo 2. Vue de la glace d'accroissement observée en bordure de la dépression thermokarstique développée au milieu de la lithalse. La photo a été prise à l'endroit indiqué par une flèche sur la photo 1

l'argile saturée (VAN VLIET-LANOË, 1987, p. 71). Aussi, il est vraisemblable que c'est la couverture isolante de craie poreuse qui explique l'existence de cette lithalse dans des conditions de températures plus élevées que celles décrites en Hudsonie.

CONCLUSION

Nous proposons dans le présent article de dénommer lithalses toutes les buttes sans couverture de tourbe dont la taille est comparable à celle des palses et qui sont apparues par formation de glace de ségrégation dans les régions de pergélisol discontinu. Les lithalses connues de Hudsonie sont situées à l'extrémité nord de la zone d'extension des palses, c'est-à-dire à la limite du pergélisol discontinu. Les traces fossiles de ces lithalses paraissent avoir une signification paléoclimatique précise mise en évidence par la comparaison de données climatiques actuelles des zones à lithalses de Hudsonie avec celles du Dernier Dryas qui ont vu apparaître des lithalses sur le plateau des Hautes Fagnes en Belgique. Ces indications paléoclimatiques ne sont cependant significatives que si les lithalses considérées ne sont pas confondues avec d'autres dont nous venons de donner un exemple au Yukon. Ce dernier type de lithalse apparaît sous des sédiments lacustres de très faible densité qui, de ce fait, sont très isolants et jouent dans la balance thermique un rôle partiellement équivalent à celui de la tourbe dans les palses.

Toutefois l'un de nous (S. HARRIS) estime qu'il y a aussi des lithalses au Yukon qui sont apparues dans des colluvions de densité normale et qui sont stables sous le climat relativement chaud actuel. Cela indiquerait qu'une température moyenne annuelle de l'air de -5°C n'est pas indispensable pour que des lithalses apparaissent et que -2°C serait suffisant pour leur donner naissance.

REMERCIEMENTS

Le travail de terrain a été possible grâce à une bourse NSERC (Canada) accordée au Dr S.A. Harris et un subside que le FNRS (Belgique) a attribué à A. Pissart.

Bibliographie

- AHMAN, R., 1976 – The structure and Bibliographie morphology of minerogenic palsas in Northern Norway. *Biul. Peryglacjalny*, 26; p. 25–31.
- AHMAN, R., 1977 – Palsar i Nordnorge (Summary: Palsas in Northern Norway). Meddelanden fran Lunds Universitets Geografiska Institution, 156 p.
- AKERMAN, H. J., 1982 – Observations on palsas within the continuous permafrost zone in eastern Siberia and in Svalbard. *Geografisk Tidsskrift*, 82; p. 45–51.

- ALLARD, M., SEGUIN, M. K., LEVESQUE, R., 1986 – Palsas and mineral permafrost mounds in northern Quebec. In: GARDINER – V. International Geomorphology, Part II, John Wiley & Sons. Ltd. : 285–309.
- ALLARD, M., CARON, S., BEGIN, Y., 1996 – Climatic and ecological controls on ice segregation and thermokarst: the case history of a permafrost plateau in Northern Quebec. *Permafrost and Periglacial Processes*, 7; p. 207–227.
- BROWN, R. J. E., 1973 – Ground ice as an initiator of landforms in permafrost regions. 3rd Guelph Symposium on Geomorphology. Research in polar and alpine Geomorphology, Proceedings; p. 25–42.
- BURN, C. R., 1988 – The development of near-surface ground ice during the Holocene at sites near Mayo, Yukon Territory, Canada. *Journal of Quaternary Science*, 3; p. 31–38.
- CHENG, G., 1983 – The mechanism of repeated-segregation for the formation of thick layered ground ice. *Cold Regions Science and Technology*, 8; p. 57–66.
- DEVER, L., HILLAIRES-MARCEL C., FONTES, J. CH., 1984 – Composition isotopique, géochimie et genèse de la glace en lentilles (palsen) dans les tourbières du Nouveau-Québec (Canada). *Journal of Hydrology*, 71; p. 107–130.
- DIONNE, J. C., 1978 – Formes et phénomènes périglaciaires en Jamésie, Québec subarctique. *Géographie physique et Quaternaire*, 32; p. 187–247.
- EVSEEV, V. P., 1973 – Monticules de boursoufflement de migration. Second international conference on Permafrost, Yakutsk; p. 98–102.
- FORSGRÉN, B., 1968 – Studies on palsas in Finland, Norway and Sweden, 1964–1966. *Biul. Peryglacjalny*, 17; p. 117–123.
- FORTIER, R., LEVESQUE, R., SEGUIN, M. K., ALLARD, M., 1991 – Caractérisation du pergélisol de buttes cryogènes à l'aide de diagraphies électriques au Nunavik, Québec. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2; p. 79–93.
- FRANKS, F. 1983 – Water. Edit. Royal Society of Chemistry, London, 96 p.
- FRENCH, H. M., 1996 – The periglacial environment. Longman; 341pp, (second edition).
- FRIEDMAN, J. D., JOHANSSON, C. E., OSKARSSON, N., SVENSSON, H., THORARINSSON, S., WILLIAMS R. S., 1971 – Observations on Icelandic polygon surfaces and palsa areas. Photo interpretation and field studies. *Geografiska Annaler*, 53A; p. 115–144.
- HARRIS, S. H., 1993 – Palsa-like mounds developed in a mineral substrate, Fox Lake, Yukon territory. Sixth International Conference on Permafrost. July 5–9, 1993 Proceedings, Beijing, China. 1; p. 238–243.
- HARRIS, S.H., FRENCH, H. M., HEGINBOTTOM, J. A., JOHNSTON, G. H., LADANYI, B., SEGO D. C., VAN EVERDINGEN, R. O., 1988 – La terminologie du pergélisol et notions connexes. Conseil national de recherches du Canada, Note de service technique no. 142; 154 pp.
- HIRAKAWA, K., 1986 – Development of a palsa bog in central highland, Iceland. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 21; p. 111–122.
- ISARIN, R. F. B., 1997 – The climate in north-western Europe during the Younger Dryas. A comparison of multi-proxy climate reconstructions with simulation experiments. Drukkerij Elinkwijk b.v., Utrecht, 160 pp.
- LAGAREC, D., 1973 – Eléments de la morphologie cryogène du Golfe de Richmond, Nouveau-Québec. *Cahiers de Géographie du Québec*, 17; p. 465–482.
- LAGAREC, D., 1976 – Etudes géomorphologiques de palses dans la région de Chimo, Nouveau-Québec, Canada. *Cahiers géologiques (Paris)*, 92; p. 153–162.
- LAGAREC, D., 1982 – Cryogenetic mounds as indicators of permafrost condition, northern Québec. In: French, H. M., edit., The Roger J. E. Brown Memorial Volume, Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference, Calgary, Alberta, March 2–6, 1981, Ottawa, National Research Council of Canada; p. 43–48.
- LAGERBÄCK, R., RODHE, L., 1985 – Pingos in northernmost Sweden. *Geografiska Annaler*, 67A; p. 239–245.
- LLIBOUTRY, L. 1964 – Traité de glaciologie. Masson., T 1, 427 pp.

- LUNDQVIST, G., 1953 – Tillägg till palsfragan. *Geol. Fören. Förhandl.*, 73; p. 149–154.
- LUNDQUIST, J., 1969 – Earth and ice mounds: a terminological discussion. In: PÉWÉ, T. L. The periglacial environment, Montreal, McGill–Queen's University Press; p. 203–215.
- MACKAY, J. R., 1972 – The world of underground ice. *Annals of the Association of American Geographers*, 62; p. 1–22.
- NELSON, F. E., HINKEL, K. M., OUTCALT, S. I., 1992 – Palsa-scale frost mounds. In: DIXON, J. C., ABRAHAM, A. D., Periglacial Geomorphology: Proceedings of the 22nd Annual Binghamton Symposium in Geomorphology, Chichester, John Wiley and Sons; p. 305–325.
- PAYETTE, S., SAMSON, H., LAGAREC, D., 1976 – The evolution of permafrost in the taiga and in the forest-tundra, western Québec-Labrador Peninsula. *Journal canadien de la recherche forestière*, 6; p. 203–220.
- PAYETTE, S., SEGUIN, M. K., 1979 – Les buttes minérales cryogènes dans les basses terres de la Rivière aux Feuilles, Nouveau-Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, 33; p. 339–358.
- PISSART, A., 1956 – L'origine périglaciaire des viviers des Hautes Fagnes. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 79; p. B119–B131.
- PISSART, A., 1974 – Les viviers des Hautes Fagnes sont des traces de buttes périglaciaires. Mais s'agissait-il réellement de pingos? *Annales de la Société géol. de Belgique*, 97; p. 359–381.
- PISSART, A., 1975 – Glace de ségrégation, soulèvement du sol et phénomènes thermokarstiques dans les régions à périgelisol. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 11; p. 89–96.
- PISSART, A., 1985 – Pingos et Palses : un essai de synthèse des connaissances actuelles. *Inter-Nord*, 17; p. 21–32.
- PISSART, A., JUVIGNE, E., 1980 – Genèse et âge d'une trace de butte périglaciaire (pingo ou palse) de la Konnerzvenn (Hautes Fagnes, Belgique). *Annales de la Société géol. de Belgique*, 103; p. 73–86.
- PISSART, A., GANGLOFF, P., 1984 – Les palses minérales et organiques de la vallée de l'Aveneau, près de Kuujuaq, Québec subarctique. *Géographie physique et Quaternaire*, 38; p. 217–228.
- RUUHIJÄRVI, R., 1960 – Über die regionale Einteilung der nord-finnischen Moore. *Ann. Bot. Soc. "Vanamo"*, 31; 360 pp.
- SCHUNKE, E., 1973 – Palsen und Kryokarst in Zentral-Island. *Nachrichten d. Akad. d. Wiss. Göttingen*, 2, Math.-Phys. Klasse, (4); p. 65–102.
- SEPPÄLÄ, M., 1986 – The origin of palsas. *Geografiska Annaler*, 68A; p. 141–147.
- SEPPÄLÄ, M., 1988 – Palsas and related forms. In: CLARK, M. J., Advances in Periglacial Geomorphology, Chichester, John Wiley and Sons; p. 247–278.
- SPOLANSKAYA, N. A., EVSEYEV, V. P., 1973 – Domed-hummocky peatbogs of the northern taiga in western Siberia. *Biul. feryglacjalny*, 22; p. 271–283.
- SVENSSON, H., 1961–1962 – Nagra iakttagelser fran palsomraden. *Norsk Geogr. Tidsskrift*, 18; p. 212–227.
- SVENSSON, H., 1964 – Traces of pingo-like frost mounds. *Svensk. geogr. Arsbok*, 40; p. 93–106.
- TABER, S., 1928 – Frost Heaving. *Journal of Geology*, 37; p. 428–461.
- TABER, S., 1930 – The mechanics of frost heaving. *Journal of Geology*, 38; p. 303–318.
- VAN EVERDINGEN, R. O., 1998 – Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms in Chinese, English, French, German, Icelandic, Italian, Norwegian, Polish, Romanian, Russian, Spanish and Swedish. Edited by van Everdingen and printed by the University Printing Services of the University of Calgary; 268 pp.
- VAN VLIET-LANOE, B., 1987 – Le rôle de la glace de ségrégation dans les formations superficielles de l'Europe de l'Ouest. Processus et héritages. Thèse de doctorat d'Etat, Mention Géographie, Université de Paris I–Sorbonne, tome 1; 378 pp.
- WASHBURN, A. L., 1979 – Geocryology. A survey of periglacial processes and environments. Edward Arnold, edit.; 406 pp.

- WASHBURN, A. L., 1983a – Palsas and continuous permafrost. In: *Permafrost, Proceedings of the Fourth International Conference, Washington, D.C., National Academy Press*, 1 (2); p. 1372–1377.
- WASHBURN, A. L., 1983b – What is a palsa? In: *H. Poser, E. Schunke, Mathematisch-Physikalische Klasse, Dritte folge, Mesofirmen des reliefs im heutigen Periglazialraum. Bericht -ber ein Symposium, Göttingen, Vandenhoeck & Ruprecht*, 35; p. 34–47.
- WEIDONG, A., ALLARD, M., 1995 – A mathematical approach to modelling palsa formation: insights on processes and growth conditions. *Cold Regions Science and Technology*, 23; p. 231–244.
- WORSLEY, P., GURNEY, S. D., COLLINS, P. E. C., 1995 – Late Holocene “mineral palsas” and associated vegetation patterns: a case study from lac Hendry, Northern Quebec, Canada and significance for European Pleistocene thermokarst. *Quaternary Science Reviews*, 14; p. 179–192.
- WRAMNER, P., 1967 – Studier av palsmyrar i Laivadalen, Lappland. *Teknik och Natur*, (Göteborg); p. 435–449.
- WRAMNER, P., 197a – Palslika bildningar i mineraljord. Nagra iakttagelser från Taavavuoma, Lappland (Summary: Palsa-like formation in mineral soil. Some observations from Taavavuoma, Swedish Lapland). Göteborgs Universitet Naturgeografiska Institutionen, Guni rapport 1; 60 pp.
- WRAMNER, P., 1972b – Tjällyftning i torvjord en laboratorieundersökning (Summary: Frost heave in peat, a laboratory study). Göteborg Universitet Naturgeografiska Institutionen, Guni rapport 2; 63 pp.
- WRAMNER, P., 1973 – Palsmyrar i Taavavuoma, Lappland (Summary: Palsa bogs in Taavavuoma, Swedish Lapland). Göteborg Universitets Naturgeografiska Institutionen, Guni rapport 3; 140 pp.
- ZOLTAI, S. C., TARNOCAL, C., 1971 – Properties of a wooded palsa in northern Manitoba. *Arctic and Alpine Research*, 3; p. 115–129.
- ZOLTAI, S. C., TARNOCAL, C., 1975 – Perennially frozen peatlands in the western Arctic and Subarctic of Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 12; p. 28–43.