

## LA CROISSANCE LATÉRALE DES LITHALSES.

A. Pissart

*Professeuse émérite à l'Université de Liège. Station scientifique des Hautes Fagnes*

### 1. Introduction

La thèse de Fabrice Calmels intitulée "Genèse et structure du pergélisol. Etudes des formes périglaciaires de soulèvement au gel au Nunavik (Québec nordique), Canada" a été librement disponible sur internet. C'est là que nous l'avons trouvée et ensuite lue et relue avec un très grand intérêt. Cette thèse de doctorat a été préparée sous la direction de Michel Allard à la Faculté des Etudes supérieures de l'Université Laval, Québec, dans le cadre du programme de doctorat en sciences géographiques pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.). Elle a été défendue en 2005 à l'Université de Caen (France).

Cette thèse est consacrée à l'étude de lithales, pases et plateaux de pergélisol. Beaucoup de données qui y sont rassemblées résultent de l'étude d'une lithale qui est actuellement la mieux étudiée au monde. En effet, des sondages l'ont traversée jusqu'à atteindre la roche en place (gneiss) à une dizaine de mètres de profondeur. Par la suite, par des capteurs de température placés dans ces sondages, l'évolution thermique de cette lithale a été suivie pendant 5 ans.

Plusieurs sondages réalisés dans cette lithale ont été effectués grâce à des subsides du "Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, Hannover, Germany)" d'où l'appellation BGR donnée à cette butte périglaciaire. Des articles concernant cette lithale ont paru avant la présentation de la thèse de Calmels (Delisle *et al.* 2003 ; Buteau *et al.* 2004 ; Delisle et Allard, 2003) ; des articles présentant des parties de la thèse ont paru par la suite dans différentes revues (Calmels et Allard, 2004 ; Calmels, F. *et al.*, 2005 ; Calmels, F. *et al.*, 2008a ; Calmels, F. *et al.*, 2008b ; Calmels, F. *et al.*, 2008c).

Les données détaillées dans cette thèse et nos observations sur les traces de lithales des Hautes Fagnes permettent d'avancer l'hypothèse que les lithales ne se développent pas seulement verticalement par soulèvement du sol, mais qu'elles s'élargissent aussi latéralement en repoussant les matériaux. Autrement dit, les remparts des lithales ne se formeraient pas simplement par la descente de matériaux sur les pentes des lithales. Ce sont des arguments en faveur de cette hypothèse que nous présentons ci-dessous.

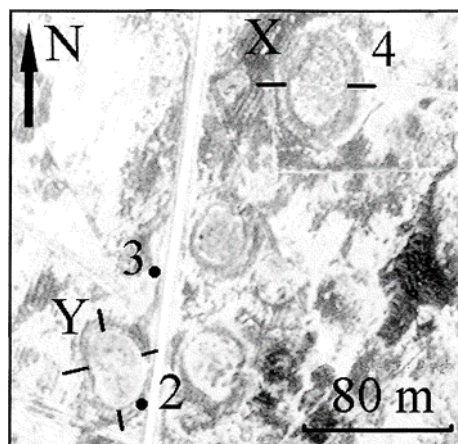
## 2. Les observations en faveur d'une croissance latérale des lithalses d'après les observations de F. Calmels en Hudsonie et de A. Pissart en Belgique

a) *La forme régulière ronde ou ovale de la majorité des lithalses est difficilement explicable par un simple soulèvement vertical du sol.*

Certaines traces de lithalses des Hautes Fagnes sont, en plan, parfaitement circulaires ou ovales (figure 1) comme d'ailleurs beaucoup de lithalses de Hudsonie (figure 2) et notamment celle étudiée par F. Calmels (figure 3). A notre connaissance, cette disposition très régulière, circulaire ou ovale, n'a jamais attiré l'attention et aucune explication n'a été avancée pour en rendre compte. Les lithalses diffèrent ainsi des "permafrost plateaus" qui ont souvent une forme en plan irrégulière et ne laissent pas de remparts après leur fusion. Un bon exemple de ce type de butte a été décrit par Allard *et al.* (1996).

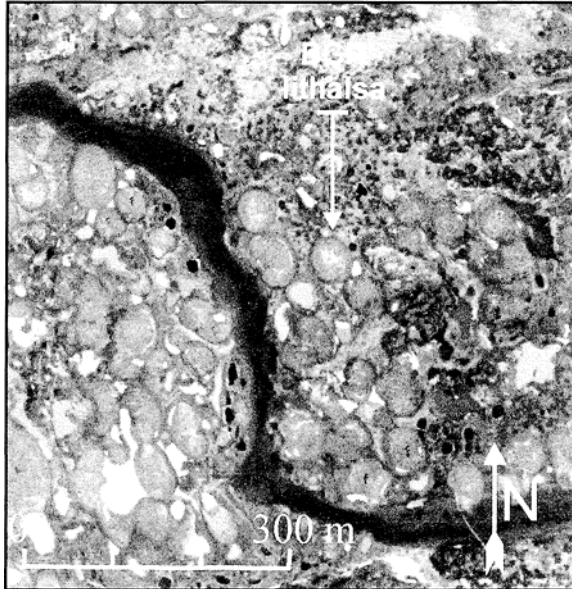
Des remparts circulaires réguliers vont de soi pour des traces de pingos (glace d'injection) donnant des buttes élevées approximativement coniques sur les pentes desquelles les matériaux descendent par des processus de versant. Comme nous le montrons plus loin, il n'en va pas de même pour les lithalses dont l'élévation est seulement de quelques mètres.

**Figure 1.** *Vue aérienne de traces de lithalses ovales au lieu-dit Brackvenn (Hautes Fagnes, Belgique).*



La tranchée de la figure 5 a été réalisée, selon le trait proche du chiffre 4. Le profil topographique de cette même forme X est donné sur la figure 7. Les deux profils de la lithalse Y sont rassemblés sur la figure 8. Les traits de part et d'autre des remparts donnent l'orientation des profils. La localisation des sondages 2 et 3 est indiquée par ces deux chiffres. En 4, le profil de la figure 3 montre des phyllades en place à 2 m de profondeur.

**Figure 2.** Photo aérienne verticale prise en 1957 du champ de lithalses de Hudsonie (lat.56°36'63N, long.76°12'85 W) où se trouve la "BGR lithalsa" de 50 m de diamètre étudiée par Calmels (thèse, figure 5.3, p. 90 ; Calmels et al., 2008).



**Figure 3.** La "BGR lithalsa" vue en juillet 2000. Cette forme du Québec septentrional de 50 m de diamètre a été étudiée en détails par Cal mets (Calmels, thèse fig. 3.2, p. 31, 2005). Il en sera longuement question dans le présent article (voir figures 6, 10 et 11). L'hélicoptère donne l'échelle.

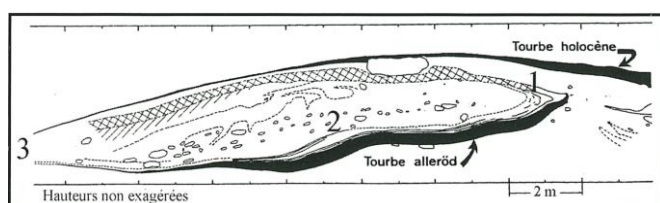


*b) Une croissance latérale a été observée dans des remparts de plusieurs traces de lithalses des Hautes Fagnes.*

La figure 4 montre une coupe réalisée dans le rempart d'une lithalse des Hautes Fagnes en Belgique (Pissart et Juvigné, 1980 ; Pissart, 2000, 2003) qui établit très clairement que la bordure de la lithalse s'est déplacée latéralement. En effet les formations litées mises en place par ruissellement immédiatement au-dessus de la tourbe alleröd indiquent, par leur épaisseur, les endroits où se localisait la concavité qui constituait la limite extérieure du rempart. Cette concavité s'est trouvée d'abord en 1, puis, par soulèvement de la couche de tourbe et des formations situées en dessous, elle a migré en 2. Par la suite, l'arrivée de matériaux sur la pente a

déplacé cette concavité de 2 en 3, un peu au-delà de la limite gauche de cette figure 4. La figure 5 montre une tranchée dégagée dans la Brackvenn en bordure de la lithalse ovale, à proximité du chiffre 4 inscrit sur la photo aérienne de la figure 1. Elle atteste de la même manière un déplacement de la concavité de 1 en 2 sur une distance de l'ordre de 7 m.

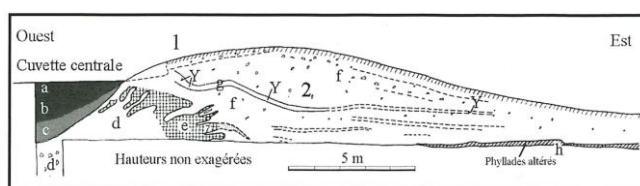
**Figure 4.** Coupe au travers du rempart d'une lithalse des Hautes Fagnes publiée en 1980 par Pissart et Juvigné et reproduite dans Pissart, 2000 et 2003.



La couche de tourbe alleröd déposée avant la croissance de la lithalse a permis de donner son âge. Les épaissements des couches ruisselées permettent d'établir que la concavité extérieure du rempart a été d'abord en 1, puis en 2 et enfin, en 3 (ce chiffre devrait être un peu plus à gauche, à la rupture de pente limitant le rempart). Le déplacement de 1 en 2 résulte de l'élargissement de la lithalse par poussée profonde, le passage de 2 en 3 est le résultat de l'accumulation de dépôts de pente.

Ross Mackay (1979, p. 42) a souligné qu'une différence entre les pingos et les palses (on ne parlait pas encore des lithalses à ce moment) consistait dans la croissance latérale des secondes alors que les premières ne se développaient pas latéralement. Comme des tranchées réalisées dans les remparts des Hautes Fagnes (Belgique) dont celles données sur les figures 4 et 5 montraient clairement une telle croissance latérale, nous en avons tiré argument pour défendre que ces dépressions fermées entourées de remparts n'étaient pas des traces de pingos (Pissart et Juvigné, 1980). Cette croissance latérale n'est toutefois enregistrée ici dans la première coupe (figure 4) que sur 15 m de distance. Le déplacement latéral de 1 en 2 sur une distance de 7 m est dû à une poussée des formations sous la tourbe ; pour les 8 m suivants, elle résulte de l'accumulation de dépôts de pente en bordure de la lithalse.

**Figure 5.** Coupe réalisée dans le rempart de la trace de lithalse X de la figure 1 (Hautes Fagnes, Belgique). L'étude de cette tranchée a été publiée en 1974 (Bastin et al., 1974).



Légende : a, tourbe noire ; b, gyttja ; c, limon argileux bleuâtre ; d, limon argileux avec blocs de quartzite ; e, couche de couleur légèrement différente ; f, complexe de limon avec débris de quartzite ; g, couche limoneuse un peu plus claire pratiquement sans cailloux et avec une teneur en carbone élevée qui correspond à la surface du sol avant la croissance de la lithalse ; h, phyllades très altérés en place. En Y dans la couche g : tephra de l'éruption du Laacher See. La concavité du rempart a été marquée dans la couche g, d'abord en 1, puis en 2.

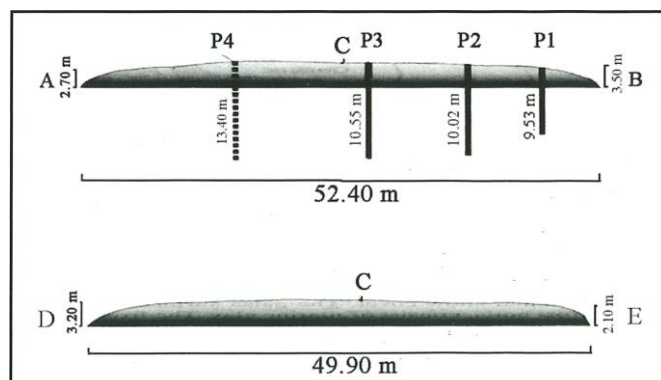
La coupe de la figure 5 (Bastin et al., 1974) montre que 23 % du rempart de cette trace de lithalse résultent du déplacement de matériaux sous la surface initiale du sol pendant la croissance de la lithalse et que 77 % du rempart proviennent de processus de versant sur les pentes de la lithalse. Pour la coupe de la Konnerzvenn (figure 4), 38 % du rempart sont dus au basculement des couches profondes et 62 % aux processus de versants. La déformation des

matériaux profonds, sous la surface originelle, ne peut guère résulter d'un simple soulèvement du sol comme nous l'avons supposé en 1980, mais indique l'existence d'un déplacement latéral des sédiments.

*c) Le transfert des matériaux des lithaleses vers les remparts est difficilement explicable par les processus de versant vu les faibles pentes qui existent sur celles-ci. Les profils de nombreuses cuvettes des Hautes Fagnes indiquent que les lithaleses des Hautes Fagnes étaient aussi peu élevées.*

Il est généralement admis que les remparts laissés par les lithaleses et les pingos sont apparus par accumulation de matériaux descendus sur les pentes de ces buttes périglaciaires. Toutefois, les lithaleses actuelles telles qu'elles sont décrites au Québec sont toujours peu élevées et leurs surfaces sont presque horizontales. La hauteur maximale des lithaleses en Hudsonie ne dépasse pas 7 mètres (communication orale de M. Allard en 2002).

**Figure 6.** Profil sans exagération des hauteurs de la lithaleses BGR étudiée par Calmels en Hudsonie (figure 3).



Les sondages proches de ces deux profils perpendiculaires l'un à l'autre sont indiqués. La hauteur du sommet C par rapport à la surface du sol qui entoure la butte varie entre 2,10 m et 3,50 m.

Vu la forme des lithaleses, le déplacement de quantités aussi importantes de matériaux par des processus de transport en masse n'est guère vraisemblable. Ainsi, la lithalase étudiée par Calmels (figure 3) a 50 m de diamètre et 3.50 m d'élévation (Figure 6). Des pentes accentuées n'existent qu'à la bordure de cette lithalase sur moins de 10 m de longueur. En ces endroits, évidemment, les agents de transport en masse sont très actifs comme le montre l'inclinaison des piquets implantés verticalement en bordure d'une autre lithalase de Hudsonie (Figure 7).

Pour la trace de lithalase x de la figure 2, le volume du rempart correspond bien au volume de la cuvette apparue au moment de la fusion de la glace. Ce volume représente approximativement 3000 m<sup>3</sup>. Cela correspond à une cuvette dont la profondeur moyenne est un peu inférieure à 2 m qui ne peut correspondre qu'à une lithalase peu élevée. Le problème qui se pose est de savoir comment cette masse de terre a été transférée en bordure de la lithalase.

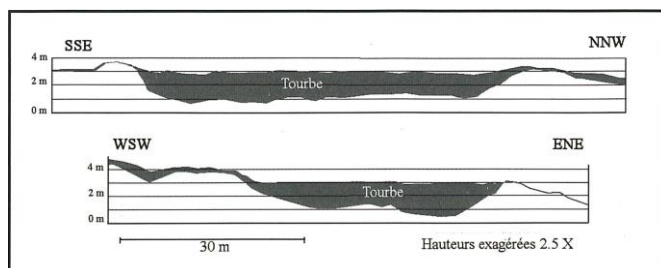
**Figure 7.** Photo reçue de Fabrice Calmels montrant clairement par l'inclinaison de piquets initialement verticaux le déplacement de la couche active en bordure d'une lithalse de Hudsonie.



d) Les profils de nombreuses cuvettes remplies de tourbe des Hautes Fagnes indiquent aussi que les lithalses des Hautes Fagnes étaient peu élevées.

Nous ne connaissons actuellement que les profils de quelques cuvettes remplies de tourbe qui sont apparues lorsque la glace des lithalses a fondu. Nous savons toutefois que dans de nombreux cas les dépressions sont peu profondes, comme celle que montre la figure 8, avec un fond plat et une profondeur moyenne de l'ordre de 2 m par rapport au niveau originel du sol.

**Figure 8.** Profils perpendiculaires de la trace de lithalse désignée par la lettre Y sur la figure 1.



Cette trace de lithalse se trouve près des sondages 2 et 3 indiqués aussi sur la figure 1. Ces sondages établissent le peu d'épaisseur des matériaux limoneux en cet endroit, ce qui explique vraisemblablement la faible profondeur de cette cuvette.

e) Si les remparts s'étalent formés uniquement par descente des matériaux surmontant les lithalses, cette action aurait déclenché des phénomènes thermokarstiques entraînant leur fusion.

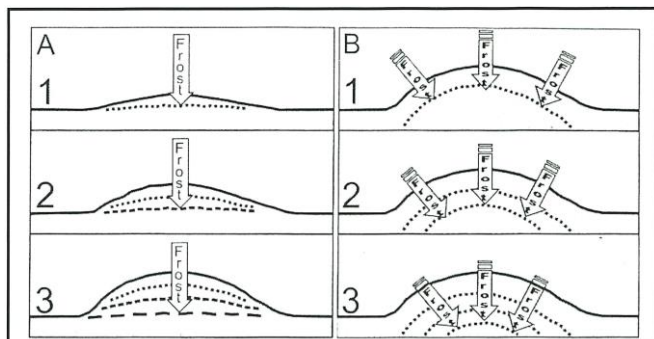
La quantité de glace observée dans les sondages réalisés par Calmels dans la lithalse BGR est en volume de 61.9 et 60.3 %, valeurs qui atteignent leur maximum de 80.0 % et 78.5 % au sommet du pergélisol (Calmels et Allard, 2008). Il est malaisé d'admettre qu'une érosion à la surface de la lithalse ne déclenche pas des phénomènes thermokarstiques qui mettent en danger l'existence même de la butte. Par contre, il est vraisemblable que la forte érosion sur la bordure de la lithalse est responsable de la fusion généralement observée des lithalses près de leur bordure.

f) La position oblique des lentilles de glace au cœur de la lithalse BGR suggère un élargissement par croissance latérale du pergélisol.

L'argument le plus fort en faveur d'un élargissement est l'observation de lentilles de glace de ségrégation inclinées par rapport à l'horizontale. Malheureusement, l'orientation des sondages réalisés dans la lithalse n'a pas été enregistrée. Par conséquent la direction des pendages des lentilles de glace n'est pas connue. Toutefois Calmels souligne (thèse p. 64) : "Depuis le sommet du pergélisol jusqu'à 2.50 m de profondeur la plupart des lentilles de glace sont horizontales et les joints verticaux ainsi que les failles sont rares. Plus bas, les lentilles de glace sont très inclinées." Comme les lentilles de glace apparaissent parallèlement à la direction du front de gel, cette observation suggère fortement que le gel a pénétré verticalement dans la lithalse à la partie supérieure de celle-ci (peut-être de la glace d'aggradation postérieure à la formation de la lithalse), mais obliquement à plus grande profondeur.

Calmels et Allard (2008) ont été évidemment très attentifs à cette disposition. Leur figure 12 (figure 9) suggère comment cette inclinaison des lentilles de glace aurait pu être acquise soit par un gel simplement vertical, soit par un gel perpendiculaire à la surface de la lithalse qui se soulève. Ces explications ne sont pas satisfaisantes si on tient compte de la forme réelle de la lithalse qui, avec 50 m de diamètre, est haute de 3.5 m avec les 3/4 de cette dénivellation sous forme de pente forte en bordure.

**Figure 9.** Deux explications proposées (Calmels, thèse, figure 6.14, p. 145; Calmels et Allard 2008b, fig. 12) pour expliquer l'inclinaison des couches de glace qu'ils observent dans les lithaltes.



La forme de la lithalse esquissée sur cette figure ne correspond pas du tout avec la forme de la lithalse BGR qui est dessinée sur notre figure 6.

### g) Conclusion

Si aucune des remarques ci-dessus à elle seule ne paraît susceptible de prouver l'existence d'une croissance latérale, leur conjugaison mérite une attention particulière.

Nous discuterons dans la dernière partie du présent article du mécanisme possible responsable de cette croissance latérale à la lumière des uniques et excellentes observations de régime thermique de la lithalse BGR reportées par Calmels (thèse 2005 et Calmels *et al.*, 2008).

### 3. Les processus responsables de l'élargissement des lithaleses

En plus des observations mentionnées précédemment, il convient de prendre aussi en compte le fait que les lithaleses de Belgique sont apparues au-dessus de petites nappes aquifères dans des quartzites désagrégés comme nous l'avons proposé dans l'article publié dans le fascicule 276 de *Hautes Fagnes* (Pissart, 2009).

La lithalse BGR (Figure 3) étudiée par Calmels dont nous avons parlé longuement repose aussi sur des matériaux grossiers interposés entre le gneiss et les formations limoneuses où a grandi la glace de ségrégation. A ce propos, Fabrice Calmels avec qui nous avons longuement correspondu à propos de sa thèse m'a écrit : "Ce qu'il faut retenir pour l'essentiel, c'est qu'il y a une couche de matériel grossier au contact du bedrock. Son épaisseur peut être variable (je pense qu'elle se biseaute en suivant la pente générale du terrain). Celle-ci est gelée mais proche de son point de congélation. Il n'est donc pas exclu qu'elle présente une certaine perméabilité". Sur ce dernier point, il faut remarquer que la perméabilité d'une couche grossière à des températures peu inférieures à 0°C est nulle par rapport à la perméabilité d'une couche d'argile ou même de limon qui contient de l'eau capillaire non gelée. Nous y reviendrons plus loin. On peut donc penser que l'alimentation en eau par la base et donc la croissance de la lithalse par ce processus est arrêtée dès que la couche grossière est très peu sous 0°C. Au vu des observations que nous avons rapportées en Belgique dans le numéro précédent de la présente revue et qui montrent que des quartzites désagrégés existent sous les traces de lithaleses, nous pensons que cette couche grossière a un rôle significatif.

Par ailleurs, la remarquable thèse de F. Calmels nous a éclairé sur le régime thermique des lithaleses en enregistrant pendant 5 ans les variations de température au sein de la forme étudiée.

La situation du 1 septembre 2002 qui est représentée sur la figure 10 (figure 8 de Calmels *et al.*, 2008) permet de souligner qu'une bonne partie de la lithalse BGR se trouve à une température très proche de 0°C. Cette disposition thermique résulte de l'arrivée d'eaux en profondeur, eaux venues souterrainement du nord comme le montre clairement le profil N-S de la figure 10 (Fig. 4.8 de la thèse de Calmels, p. 71 ; figure 9 de Calmels *et al.*, 2008). Que de l'eau puisse pénétrer ainsi dans la lithalse explique d'ailleurs la présence de tritium en son sein. Cette eau ne vient pas de la base de la lithalse mais d'un niveau situé à mi-hauteur du pergélisol. Le réchauffement apporté par cette eau qui peut se déplacer à une température inférieure à 0°C comme eau capillaire comprise dans les parties minérales de la lithalse, a élevé jusqu'à près 0°C le cœur de la lithalse principalement en se transformant en glace de ségrégation. De l'eau peut donc pénétrer latéralement au cœur de la lithalse et de ce fait, en cas de refroidissement ultérieur, engendrer sa croissance.

Mais une croissance latérale de la lithalse peut résulter d'un autre processus. Le profil des températures donné par le sondage P1 (Figure 12) indique que celui-ci est implanté en bordure intérieure du rempart qui apparaîtra lors de la fusion. La température de la partie localisée au NW du sondage P1 est une pure hypothèse car aucune observation ne permet de confirmer les tracés des isothermes dans cette partie.

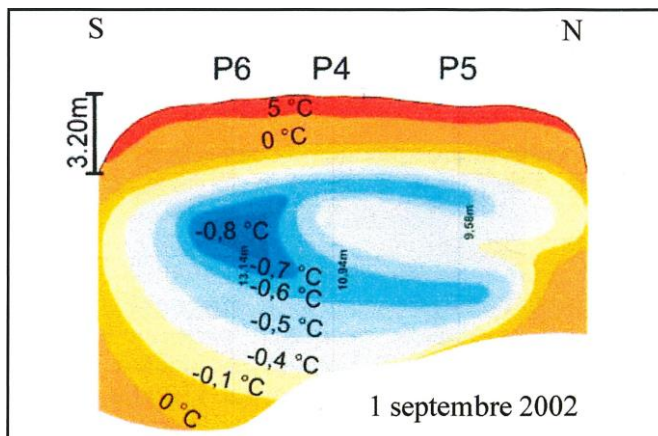


D'après les observations de Calmels, les bordures actuelles des lithales pourraient se présenter comme le montre la figure 12 (Pissart, 2007).

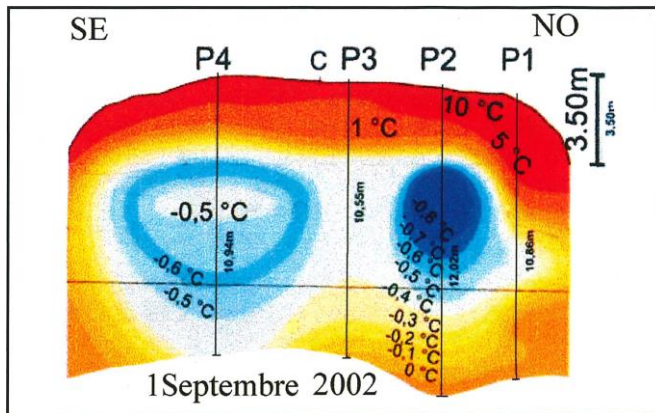
Si de la glace de ségrégation apparaît sur cette partie inclinée de la table du pergélisol, elle va provoquer une poussée qui sera perpendiculaire au front du pergélisol (figure 12). Ce processus bien décrit par Washburn (1979, p. 79) sous le nom de "frost thrusting" a été très rarement invoqué dans le domaine de la géomorphologie périglaciaire. Le terme a été proposé par Eakin en 1916 (p.76) qui n'a toutefois impliqué son action que dans l'évolution de sols polygonaux triés (Eakin, p. 80).

En d'autres mots, l'alimentation en eau par la base de la lithalse est arrêtée dès que la couche grossière sous-jacente est gelée. Par contre une alimentation latérale de la lithalse reste possible. Elle sera d'autant plus aisée qu'il existe une nappe aquifère sous la lithalse dans les matériaux sablo-graveleux provenant de la désagrégation des quartzites (en Belgique) et dans les formations grossières du Nunavik (sous la lithalse BGR). Cette alimentation en eau est privilégiée en bordure de la lithalse puisque la formation sableuse est devenue imperméable sous la lithalse elle-même.

**Figure 10.** Coupe N-S montrant les températures au sein de la lithalse BGR le 1 septembre 2002, d'après les capteurs placés dans les sondages (Calmels, thèse fig. 4-9, p. 73 ; Calmels et al., 2008).

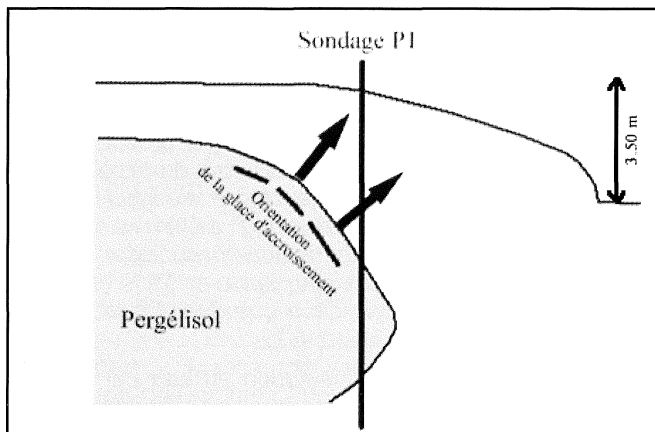


**Figure 11.** Fig. 4.8 de la thèse de Calmels, p. 71. Températures dans la lithalse de Hudsonie le 1<sup>er</sup> septembre 2002 avant la reprise de la couche active par le gel.



Les capteurs de température sont localisés uniquement dans les sondages. Aucune observation n'est recueillie à la bordure de la lithalse au NW du sondage P1 et les tracés des isothermes y sont donc incertains. La précision des mesures traitées est seulement de 0.2°C du fait des performances de l'enregistreur de données. Cette figure montre clairement que, s'il y a un pergélisol sous le sondage P1, il est en profondeur (6 m) et extrêmement limité puisque de la glace n'a pas été rencontrée. Le sondage P1 est en réalité implanté à la limite du rempart qui apparaîtra lors de la fusion de la lithalse.

**Figure 12.** Mécanisme probable à l'origine de l'élargissement des lithalses.



Le profil extérieur du rempart est celui dessiné par Calmels dans sa thèse. Il est identique à celui dessiné par Delisle et Allard (2003). L'échelle des hauteurs sur cette figure n'est pas exagérée. Les températures ont été observées à l'emplacement du sondage P1 (figure 12 extraite de Calmels, thèse p. 71). Elles permettent de reconnaître la limite du pergélisol. La glace d'accroissement qui apparaît en bordure du pergélisol est disposée parallèlement à la limite de celui-ci. L'apparition de cette glace détermine une poussée dans les sédiments orientée selon la direction de la flèche (Pissart, 2007).

Le professeur de mécanique des sols à l'Université de Liège, Albert Bolle, a calculé la poussée nécessaire pour déplacer les terres sur une épaisseur de 2 m selon la méthode de Rankine en admettant les coefficients suivants : un angle de frottement interne de 30°, une cohésion de 50 kPa et une densité des terres de 2000 Kg par m<sup>3</sup>. La poussée nécessaire pour une limite du pergélisol inclinée de 60° et une profondeur de 1 m sous une surface horizontale est de 170 kPa (1.7 atmosphère) pour déplacer les terres latéralement. A 2 m de profondeur, la poussée doit atteindre 230 KPa (soit 2.3 atmosphères). Cette glace qui grandit latéralement apparaît probablement au début de l'hiver.

Au moment du regel, quand apparaît la plus grande partie de la glace de ségrégation, la température est proche de 0°C. Mais nous savons bien que toute l'eau ne gèle pas à 0°C et qu'une quantité d'eau non négligeable subsiste à une température inférieure, eau qui va alimenter la glace de ségrégation à des températures plus basses en dégageant des pressions importantes. Même si cette quantité d'eau est minime, si le phénomène se reproduit pendant plus de 1000 ans, le déplacement qui en résulte n'est certainement pas négligeable.

Il reste toutefois à expliquer comment dans les deux coupes que nous avons étudiées dans les Hautes Fagnes, 77 et 62 % de la masse des remparts sont constitués de dépôts de pente. Il est possible que dans ces deux coupes, les processus de versants aient remanié les sédiments repoussés par la croissance de la glace et qui étaient arrivés en haut de l'abrupt.

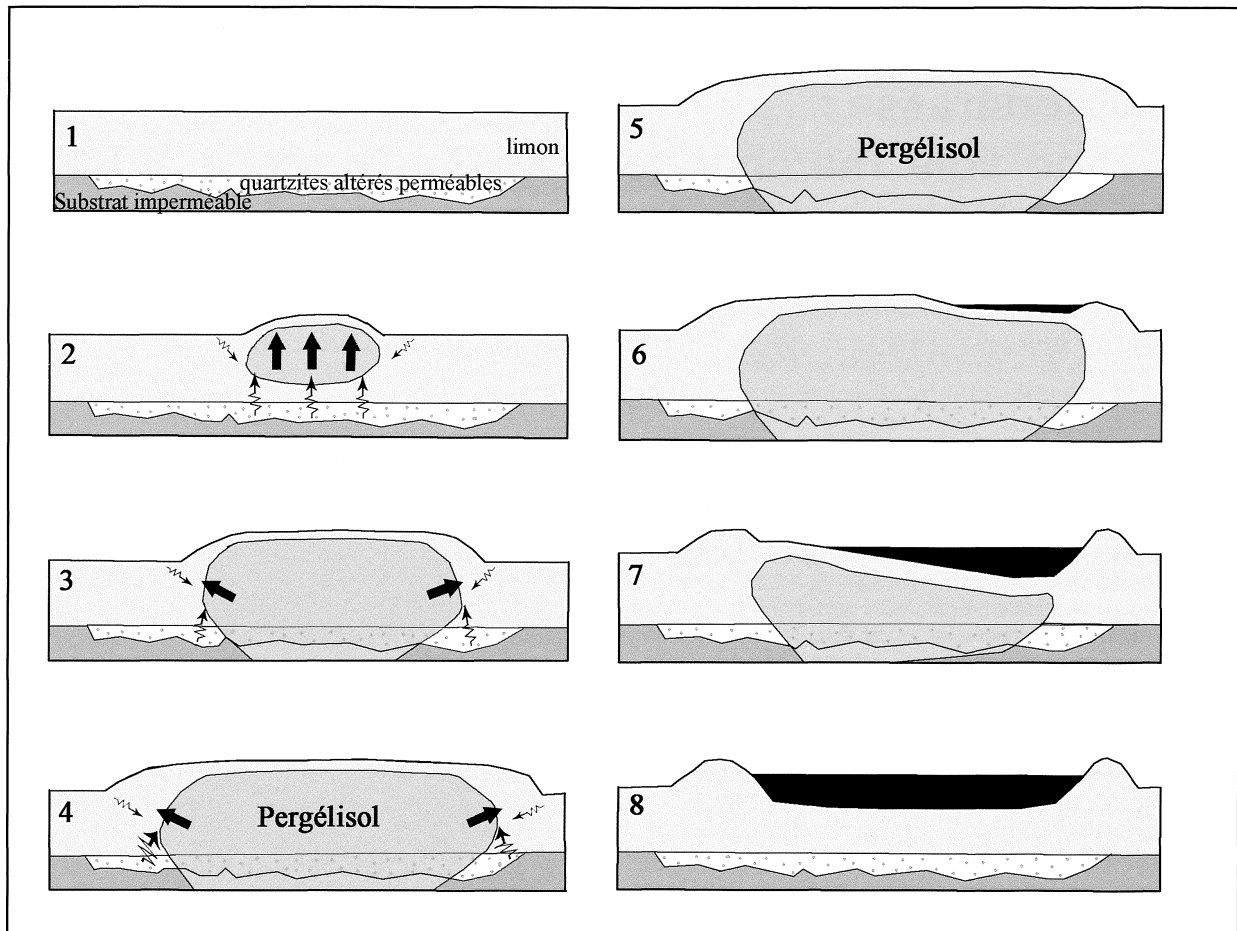
Les observations de Calmels ne permettent pas de vérifier cette hypothèse du déplacement des matériaux. Les quantités de glace qu'il a mesurées à savoir 65 % de glace, si elles se poursuivent jusqu'à 1 m de la roche en place soit sur une épaisseur de 7.50m (en décomptant la couche active et la zone sableuse de la base) doit amener un soulèvement de près de 5 m et plus là où les argiles silteuses ont 10 m d'épaisseur. Comme le soulèvement maximum mesuré sur le terrain est de 3.50 m, il manque 1.50 m de sédiments (moins le retrait de l'argile silteuse suite à son assèchement entre les lentilles de glace de ségrégation). Cette différence entre le soulèvement calculé et le soulèvement observé peut s'expliquer de deux façons, soit la teneur en glace diminue avec la profondeur, soit il y a eu effectivement déplacement des matériaux.

## Conclusions

Des arguments nombreux provenant des traces de lithales de Belgique ainsi que d'autres issus des recherches réalisées par l'équipe de Michel Allard en Hudsonie et rapportées en détail par F. Calmels dans sa thèse, permettent de supposer que les lithales s'étendent par croissance latérale et donc que les schémas de croissance des lithales proposés jusqu'ici (Pissart 2002 ; Calmels, 2005) doivent être modifiés. La figure 13 illustre notre hypothèse actuelle de croissance latérale. Bien entendu nous ignorons si ce processus de croissance latérale est important ou réduit. Il est probablement variable selon les circonstances locales. Cette incertitude sera levée lorsque des sections creusées dans des lithales montreront comment se disposent les lentilles de glace qui y sont formées. Cette même figure 13 montre comment au Nunavik les lithales disparaissent. De nombreuses observations actuelles portant sur des lithales en fusion ne laissent aucun doute quant aux stades que montre cette figure.

Il reste encore bien des points à éclaircir concernant le mode de formation des lithales. Dans un prochain article nous aborderons un autre problème non élucidé à savoir la question des lithales allongés selon la pente.

**Figure 13.** Schémas montrant la formation et la fusion d'une lithalse.



La formation (à gauche) correspond à l'hypothèse d'une croissance latérale proposée dans le présent article. Les hauteurs ne sont pas exagérées. Noter l'accroissement des volumes de matériaux formant les remparts en temps que l'élargissement de la lithalase. Schéma 1 : avant l'apparition d'un pergélisol; 2 : apparition du pergélisol et soulèvement du sol accentué au-dessus d'une petite nappe aquifère locale; 3 : l'alimentation en eau sous la lithalase n'est plus possible même si la nappe aquifère existe sous le pergélisol car le terrain sous la lithalase est imperméabilisé par les couches grossières gelées qui ne contiennent pas d'eaux capillaires ; 4 : la nappe aquifère reste alimentée par les zones hors pergélisol et l'alimentation des lentilles obliques en bordure se fait à la fois par des eaux s'infiltrant depuis la surface et aussi par des eaux montant par capillarité depuis la nappe aquifère.

Les schémas 5 à 8 (à droite) qui montrent comment disparaissent les lithalases, sont étayés par de nombreuses observations au Nunavik. La fusion ne commence jamais au centre mais toujours à la limite intérieure des remparts, sans doute à la suite d'un amincissement de la couche active en cet endroit à la suite de l'érosion de la couche superficielle qui se déplace vers l'extérieur. Les limites du pergélisol dans les différentes figures sont hypothétiques.

## Bibliographie

Allard, M., Caron, S. and Begin, Y., 1996. Climatic and ecological Controls on ice segregation and thermokarst: the case history of a permafrost plateau in Northern Québec. *Permafrost and Periglacial processes*, 7 : 207-227.

Bastin, B., Juvigné, E., Pissart, A. et Thorez, J., 1974. Etude d'une coupe dégagée à travers un rempart d'une cicatrice de pingo de la Brackvenn. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 97 : 341 -348.

Buteau, S., Fortier, R., Delisle, G. et Allard, M., 2004. Numerical simulation of the impacts of climate warming on a permafrost mound. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15 : 41-57.

Calmels, F., 2005. Genèse et structure du pergélisol. Etude des formes périglaciaires de soulèvement au gel au Nunavik (Québec Nordique au Canada). Thèse de doctorat en cotutelle Université Laval (Québec) et Université de Caen (France) présentée dans le cadre du programme de doctorat en sciences géographiques pour l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (Ph.D.), 169 pages. A été disponible librement sur Internet.

Calmels, F. et Allard, M., 2004. Ice ségrégation and gas distribution in permafrost using tomodensimetry analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 15 : 367-378.

Calmels, F. and Allard, M., 2008b. Segregated ice structures in various heaved permafrost landforms through CT Scan. *Earth surface processes and landforms*, 33 : 209-225

Calmels, F, Gagnon, O. et Allard, M. 2005. A portable earth-drill System for permafrost studies. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16 : 311-315.

Calmels, F, Allard, M. and Delisle G., 2007b, Development and decay of a lithalsa (Northern Québec): A geomorphological history. *Geomorphology*, 97(3-4) : 287-299.

Calmels, F., Delisle, G. and Allard, M. 2008. Internai structure and the thermal and hydrological régime of a typical lithalsa: signficance for permafrost growth and decay *Canadian Journal of Earth Sciences*, 45 : 31-43.

Delisle, G. et Allard, M., 2003. Numerical simulation of the ground température field in a palsa reveals strong influence of convective heat transport by groundwater. *Permafrost. Proceedings of the eighth international conférence on permafrost, 21-25 July 2003, Zurich, Switzerland, Balkema Publishers: 181 -186.*

Delisle, G., Allard, M., Fortier, R., Calmels, F. et Larrivée, E., 2003 Umiaujaq, Northern Québec : innovative techniques to monitor the decay of a lithalsa in response to climate change. *Permafrost and Periglacial processes*, 14: 375-385.

Juvigné, E. et Pissart, A., 1979. Un sondage sur le plateau des Hautes Fagnes au lieu dit la Brackvenn. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 102 : 277-284.

Mackay, J. R., 1979. Pingos of the Tuktoyaktuk peninsula area, Northwest Territories. *Géographie physique et Quaternaire*, 33 (1) : 3-61.

McRoberts, E. C. and Nixon, J. F., 1975. Some geotechnical observations on the rôle of surcharge pressure in soil freezing. *Am., Geophys. Union, Conférence on Soil-Water Problems in Cold Régions (Calgary, Alberta, Canada, 6-7 May 1975), Proceedings : 42-57.*

Muckenhausen, E., 1960. Eine besondere Art von Pingos am Hohen Venn/Eifel. Eiszeitalter und Gegenwart, 11 : 5-11.

Pissart, A., 1956. L'origine périglaciaire des viviers des Hautes Fagnes. Annales de la Société géologique de Belgique, 79 : 119-131.

Pissart, A. et Juvigné, E., 1980. Genèse et âge d'une trace de butte périglaciaire (pingo ou palse) de la Konnerzvenn (Hautes Fagnes, Belgique). Annales de la Société géologique de Belgique, 103 : 73-86.

Pissart, A., 1987. Géomorphologie Périglaciaire - Texte des leçons de la Chaire Francqui belge 1987. Edition du laboratoire de Géomorphologie et Géologie du Quaternaire de l'Université de Liège, 135p.

Pissart, A., 1998. Les traces des buttes périglaciaires des Hautes Fagnes et le climat du Dernier Dryas (13.000 à 11450 ans avant aujourd'hui). Bulletin de la classe des Sciences de l'Académie royale de Belgique, 6e série, Tome IX, 7 (12) : 403-437.

Pissart, A., 2000. The remnants of lithalsas of the Hautes Fagnes (Belgium) : a summary of present day knowledge. Permafrost and Periglacial Processes, 11 (4) : 327-355.

Pissart, A., 2002. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds. A progress report. Progress in Physical Geography, 26 (4) : 605-621.

Pissart, A., 2003. The remnants of younger Dryas lithalsas on the Hautes Fagnes Plateau in Belgium and elsewhere in the world. Geomorphology, 52 : 5-38.

Pissart, A., 2007. La formation des lithalses et leur croissance latérale. Bulletin de la classe des sciences de l'académie royale de Belgique, 6e série , 18, 273-294.

Pissart, A., 2009. Les traces de lithalses des Hautes Fagnes sont apparues sur des roches quartzitiques cambro siluriennes. Hautes Fagnes, 276(4), 22-29.

Washburn, A. L., 1979. Geocryology. A survey of periglacial processes and environments. Edit. Edward. Arnold, London, 406 p.

Williams, P. J., 1981. The surface of the earth: an introduction to geotechnical science. Longman, London and New-York, 211p.