

LE CLIMAT DES RÉGIONS OÙ APPARAISSENT AUJOURD’HUI DES LITHALSES ET LE CLIMAT DES HAUTES FAGNES PENDANT LE DERNIER DRYAS

Albert Pissart

Professeur émérite à l’Université de Liège

ABSTRACT

Des formes identiques aux “viviers” des Hautes Fagnes ont été observées en Hudsonie. Elles résultent de la fusion de lithalses qui ne sont connues que dans cette partie du Canada où les étés sont frais et le pergélisol discontinu. Ces conditions sont très rarement rencontrées et cela explique pourquoi les lithalses actuelles sont rares et les traces de lithalses comme celles des Hautes Fagnes plus rares encore.

Les températures de Hudsonie qui donnent naissance aux lithalses actuelles sont identiques aux températures qui ont existé pendant le Dernier Dryas sur le Plateau des Hautes Fagnes si l’on admet les conclusions d’une thèse récente (Isarin, 1997) présentée à l’Université d’Amsterdam. La température moyenne annuelle aurait été dans la partie des Hautes Fagnes où se trouvent les restes de lithalses de -5 °C , celle du mois le plus chaud de $+10\text{ °C}$ et celle du mois le plus froid de -20 °C . Nous expliquons ici comment ont été obtenues ces données paléoclimatiques.

Introduction

Le présent article comprend deux parties. La première a pour objet la délimitation des endroits où existent des lithalses en Hudsonie et en Laponie et la recherche des conditions climatiques qui, dans ces régions, permettent l'apparition de ces buttes cryogènes.

La seconde partie présente les résultats d'une thèse récente défendue en 1997 à l'Université d'Amsterdam et qui a été consacrée à la recherche des conditions de température qui ont existé dans l'Europe occidentale pendant le Dernier Dryas. Elle permet de définir les températures qui ont existé dans les Hautes Fagnes pendant cette période.

Les conditions de température des zones où existent actuellement des lithalses

Nous considérerons seulement les températures moyennes annuelles de l'air, ainsi que les moyennes du mois le plus chaud et du mois le plus froid, car ce sont les seules données qui ont été approchées par l'étude paléoclimatique que nous présenterons plus loin et pour lesquelles une comparaison sera possible.

LES LITHALSES DE HUDSONIE ET LEURS CONDITIONS D'APPARITION

Dans l'article que nous avons consacré dans la présente revue à la terminologie se rapportant aux viviers des Hautes Fagnes (Pissart, 1999a), nous avons souligné que si la première description de lithalses est apparue en Laponie avec la thèse de Wramner en 1972 ; presque au même moment et indépendamment, des Canadiens ont décrit l'existence de palse minérales. La terminologie est restée très controversée comme nous l'avons montré, mais les auteurs ont bien mis en évidence des deux côtés qu'il s'agissait de formes identiques aux palse, par leur aspect comme par leur genèse (Wramner, 1972 ; Lagarec, 1976).

Ayant connaissance de ces travaux, je suis allé en Hudsonie en 1982 et 1983 pour étudier ces formes avec P. Gangloff de l'Université de Montréal (Pissart et Gangloff, 1984). Les buttes que nous avons observées au cours de ces missions ont confirmé que nous nous trouvions en présence de buttes semblables à celles qui ont donné naissance aux viviers des Hautes Fagnes mais il s'agissait toutefois de buttes toujours gelées ayant conservé leur contenu en glace. De ce fait, nous n'avions pas observé des formes semblables aux viviers, c'est-à-dire des dépressions fermées entourées d'un rempart.

En 1998, dans la même région de Hudsonie, en amerrissant près du camp de travail du Professeur Serge Payette (Université Laval) sur la rivière Boniface au cours d'un voyage d'études organisé par le Professeur M. Allard après le Congrès de l'Association Internationale pour l'Etude du Pergélisol, j'ai pour la première fois observé des dépressions comparables aux viviers des Hautes Fagnes. Les photos prises d'avion (**Figure 1**) et du sol (**Figure 2**) montrent clairement la similitude avec les viviers de formes localisées au bord d'un lac où, probablement à

la suite d'une hausse du niveau des eaux, la glace du sol a entièrement disparu. Enfin ! Après avoir, pendant plus de 35 ans, recherché dans l'Arctique des formes semblables à celles des Hautes Fagnes, j'avais fini par en trouver ! L'étude de ces dépressions entreprise par l'équipe du Professeur Payette n'a à ma connaissance pas encore été publiée. Elle montrera les circonstances qui ont entraîné la fusion de la glace qui était apparue. De toute manière, la similitude d'aspect avec les viviers confirme que les lithalses de Hudsonie peuvent donner naissance à des formes identiques aux viviers.

Figures 1 et 2. *Vue d'avion et du sol de traces de lithalses de Hudsonie comparables aux viviers des Hautes Fagnes. Photos prises près du Camp du Professeur Serge Payette de l'Université Laval à proximité de la rivière Boniface (57° 45' N, 76° 15' W).*



LES TEMPÉRATURES DES RÉGIONS DE L'UNGAVA OÙ SE FORMENT ACTUELLEMENT DES LITHALSES

Il est d'un intérêt évident de connaître les conditions climatiques actuelles des zones où des lithalses apparaissent, ne serait-ce que pour définir les conditions qui ont existé pendant le Dernier Dryas sur le plateau des Hautes Fagnes.

A ce sujet, nous voudrions tout d'abord faire référence à un travail publié par An et Allard en 1995. Ces auteurs ont construit un modèle mathématique de transfert de la chaleur et de migration de l'eau pour simuler la formation à long terme du pergélisol et l'accumulation de glace de ségrégation qui se produit pendant l'apparition des paises et des buttes cryogéniques (lithalses).

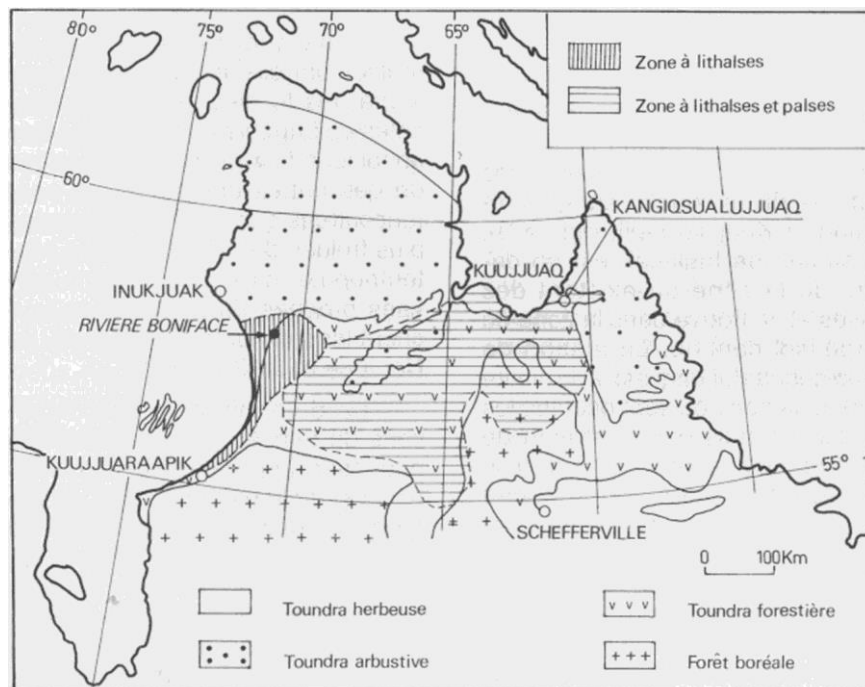
Les conditions climatiques utilisées dans ce modèle ont été observées près du village de Kangiqsualujuaq (65° 57' W, 58° 40' N ; voir localisation sur la **figure 3**), dans le Québec septentrional à l'est de la baie d'Ungava, en un endroit considéré par An et Allard comme typique de la région où apparaissent les buttes cryogéniques (lithalses) de l'est du Canada. Pendant la décennie 1980–1990, la température moyenne annuelle de l'air y a varié entre $-4,4$ °C et $-6,7$ °C avec une moyenne de $-5,8$ °C. La température moyenne de janvier a été de l'ordre de -22 °C et la température moyenne de juillet de $+9,5$ °C. Les précipitations totales ont été de 400 mm, dont 42 % était de la neige. Des étendues considérables de terrain sont toutefois dépourvues de toute couverture neigeuse pendant l'hiver, car celle-ci est déplacée par le vent. Ce site se trouve à la bordure septentrionale de la zone du pergélisol discontinu (**Figure 4**).

Le Professeur D. Lagarec de l'Université d'Ottawa, dans une lettre qu'il nous a envoyée en août 1986, nous a fourni une carte de la répartition de ces formes. Il localisait une zone où se trouvent seulement des lithalses et une zone plus méridionale où existent ensemble des lithalses et des paises. Ces zones sont dessinées sur la **figure 3**. Les limites des associations végétales que reproduit la même figure proviennent d'un article de Lavoie et Payette, 1994. La limite septentrionale des arbres correspond à la limite entre la toundra forestière et la toundra arbustive. Cette limite des arbres est la limite septentrionale des épinettes avec une tige simple, normale. La hauteur des arbres n'est pas prise en compte dans ce tracé, bien que les arbres de plus de 3 m sont très rares.

Il est d'un grand intérêt de connaître la variabilité de températures qui existe dans cette zone où sont connues les lithalses. La meilleure synthèse publiée concernant ces buttes cryogéniques réparties à l'est de la Baie d'Hudson est celle de Allard, Seguin et Lévesque (1986) qui distinguent les conditions de répartition des lithalses (qu'ils appellent en français buttes de pergélisol et en anglais permafrost mounds) et celles des paises, sans cependant en donner une cartographie. Les lithalses sont, d'après ce travail, dispersées dans la toundra arbustive au nord de la limite des arbres, soit dans un environnement où la température moyenne du mois le plus chaud est inférieure à $+10$ °C. La température moyenne annuelle y est inférieure à -5 °C. Des lithalses existent aussi d'après la même publication dans les sites les plus froids dans des clairières de la toundra forestière, ainsi que dans des sites libres de neige comme des terrasses non couvertes de forêts et des basses terrasses près de la côte.

Figure 3. Carte de Hudsonie donnant la répartition des associations végétales selon Lavoie et Payette, 1994. Sur ce document sont reportées les zones où le Professeur D. Lagarec de l'Université d'Ottawa

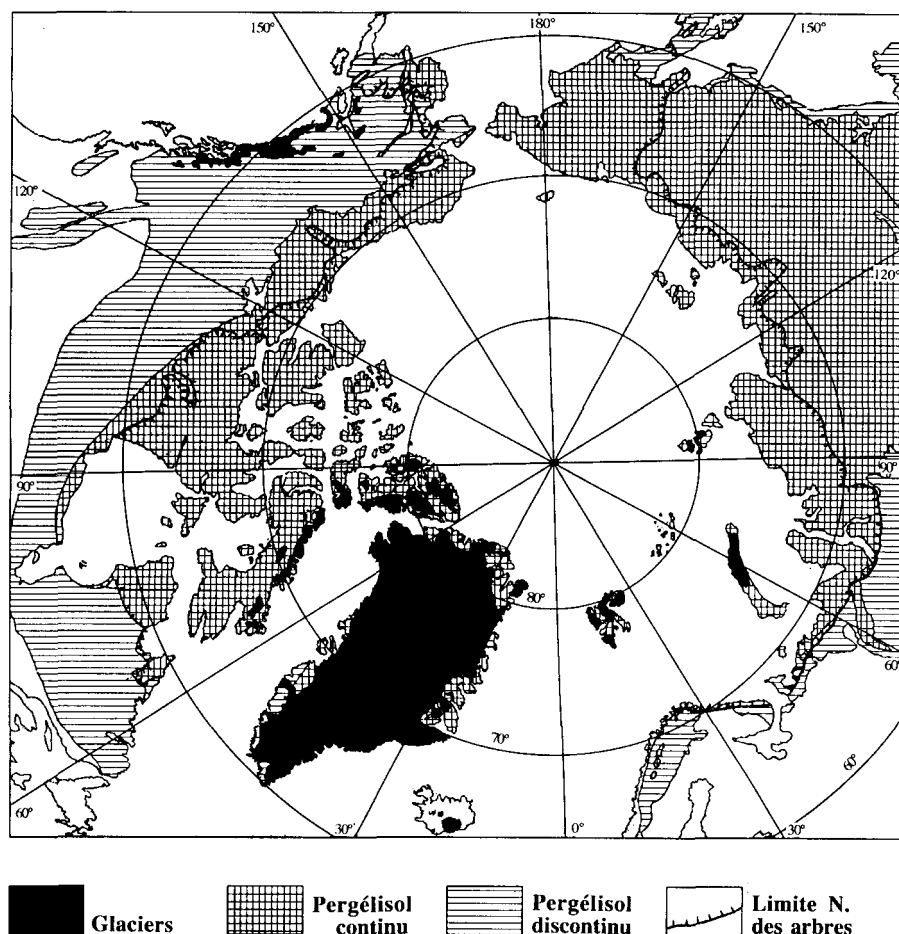
localisait les lithalses en 1986 (d'après un document manuscrit de D. Lagarec daté de 1986). Les stations météorologiques mentionnées dans le texte sont reportées sur cette figure, de même que le point près de la rivière Boniface où ont été observées les traces de lithalses que montrent les **figures 1 et 2**.



Les lithalses sont donc observées dans un environnement plus froid que celui où se localise la majorité des palses qui sont effectivement dans la zone forestière. Leur répartition est contrôlée aussi par la localisation de sédiments favorables à l'apparition de la glace de ségrégation et la majorité des lithalses sont développées dans des sédiments marins silteux. Les mêmes auteurs soulignent le rôle important de la végétation qui règle l'équilibre thermique local du sol en contrôlant principalement la distribution de la neige.

Précisons que des observations climatiques qui sont disponibles pour cette région sont peu nombreuses. Elles proviennent des stations de Inukjuak, Kangihsualujuaq et Kuujuaraapik (**Figure 3**). La station de Inukjuak est en dehors de la zone où existent des palses et se trouve dans la zone du pergélisol continu. La station de Kangihsualujuaq est à la limite nord de la zone où sont décrites les lithalses, tandis que la station de Kuujuaraapik se trouve près de la limite sud de la même zone. L'écart des températures moyennes annuelles entre les deux stations n'est que de 1,5 °C, tandis que l'écart pour la température du mois le plus froid est de 1,1 °C. Lorsque on s'éloigne de la mer, les températures de la zone où se trouvent les lithalses restent incertaines. Les stations météorologiques existantes sont en effet toutes sur la côte et l'influence de la Baie d'Hudson est importante et évidente lorsque l'on considère la répartition des associations végétales sur la côte est de la Baie (**Figure 3**). Des vents froids soufflent en effet le plus souvent vers l'est et abaissent la température d'été. Ils entraînent une augmentation de la nébulosité qui se traduit par une fréquence élevée de brouillards et de nuages bas (Saint-Laurent et Filion, 1992).

Figure 4. Répartition des zones de pergélisol continu ainsi que de pergélisol discontinu et sporadique d'après la carte du pergélisol de Brown *et al.* (1997). La limite des arbres provient du même document. Les zones où peuvent apparaître des lithalses sont celles où la limite des arbres est voisine de la limite du pergélisol discontinu. Il s'agit de l'est à l'ouest de la Hudsonie et d'une zone au nord du Lac des Esclaves au Canada, de l'extrémité ouest de l'Alaska, de Sakhaline et de la Sibérie près de la Mer d'Okhotsk, des régions situées de part et d'autre de l'Oural et enfin de la Laponie.



Aucune article ne mentionne à notre connaissance l'existence de lithalses à l'ouest de la Baie d'Hudson (mis à part les lithalses tout à fait particulières décrites dans le Yukon où la tourbe est remplacée par un matériau très léger jouant le rôle d'isolant que remplit la tourbe dans la formation des palses, Pissart *et al.*, 1998). Il est probable que des lithalses ordinaires n'existent pas de ce côté ouest de la Baie d'Hudson où l'influence de mer se fait peu sentir. De fait, la limite de la zone de pergélisol continu est de ce côté plus méridionale, tandis que la limite de la forêt est plus septentrionale en raison du climat plus continental. Comme les lithalses apparaissent dans la zone de pergélisol discontinu, mais où la température du mois le plus chaud est inférieure ou proche de 10 °C, il n'existe donc guère de probabilité d'en découvrir dans cette région (cfr. **Tableau 1**).

Tableau 1. Conditions de température de la zone de Hudsonie où existent des lithalses et de régions voisines sans lithalses.

Température moyenne du mois le plus chaud	Température moyenne annuelle	Température moyenne du mois le plus froid
Inukjuak (Allard et Seguin, 1987) (au nord de la zone à lithalses, dans une région de pergélisol continu)		
+8,5 °C	-6,7 °C	-25,2 °C
Kangiqsualujuaq (An and Allard, 1997)		
+9,5 °C	-5,8 °C	-22 °C
Kuujuaq (Worsley, Gurney and Collins, 1995)		
+11,5 °C	-6 °C	-24 °C
Poste de la Baleine Kuujuaaraapik (Allard et Seguin, 1987)		
+10,7 °C	-4,3 °C	-23 °C
Schefferville (Payette and Filion, 1993) (au sud en dehors de la zone où existent des lithalses).		
	-4 °C	

LES LITHALSES DE LAPONIE ET LEURS CONDITIONS D'APPARITION

Alors que des milliers de lithalses ont été observées en Hudsonie, les formes semblables décrites en Laponie restent rares. Des conditions favorables à l'apparition de ces buttes cryogènes ne sont rencontrées que dans les parties les plus froides de la Scandinavie septentrionale, dans des régions élevées proches du point où se touchent les frontières de Finlande, de Norvège et de Suède.

La détermination des conditions de températures nécessaires pour faire apparaître des lithalses est obscurcie par le fait que les auteurs qui décrivent des buttes de pergélisol dans cette région, les présentent soit comme des lithalses, soit comme des pingos (Lagerback and Rodhe, 1985) ou encore comme des formes intermédiaires entre pingos et lithalses (Akerman and Malmström, 1986). Certains de ces écrits sont anciens comme ceux de Svensson (1969), mais d'autres beaucoup plus récents expliquent que ces buttes comprennent à la fois de la glace d'injection et de la glace de ségrégation. Il est impossible de savoir si l'opinion de ces chercheurs n'a pas varié depuis les publications et si nous ne nous référons pas à des opinions actuellement abandonnées, de la même manière que, pour les viviers des Hautes Fagnes, des auteurs mentionnent encore mes premières publications et continuent à voir dans les viviers des Hautes Fagnes des traces de pingos.

En tout cas en Laponie, à côté de buttes cryogènes, existent aussi des dépressions fermées entourées d'un rempart qui y sont associées et dont nous parlerons dans un article ultérieur. Nous supposons ici sans le démontrer que ces buttes de pergélisol, sans couverture de tourbe, sont des lithalses et nous examinerons les conditions de température actuelles des régions où elles ont été observées. Ahman (1977) et Meier (1987) insistent vivement sur une modification climatique qui se serait produite pendant le dernier siècle dans toute la Laponie et donc aussi dans la région que nous considérons. La comparaison des cartes d'isothermes dessinées pour les

périodes 1901–1931, 1931–1960 et 1960–1974 (présentées par Ahman, 1977) montre des températures plus élevées de l'ordre de +1 °C pour 1931–1960 dans la zone dont il va être question maintenant. Les périodes prises en compte pour considérer les températures sont donc importantes.

Les rares données dont nous disposons et qui sont reproduites dans le **tableau 2**, montrent des températures moyennes annuelles de –3 à –4,5 °C et des températures du mois le plus chaud inférieures à +9 °C. Tous les sites sont décrits comme appartenant à la zone du pergélisol discontinu et se trouvent à proximité immédiate ou au delà de la limite des arbres.

Au total les conditions ne diffèrent pas beaucoup de celles que nous avons trouvées en Hudsonie bien que, dans cette dernière région, les hivers soient plus rigoureux.

Tableau 2. Conditions de température d'endroits de Laponie où existent des buttes cryogènes susceptibles d'être des lithalses.

Température moyenne du mois le plus chaud	Température moyenne annuelle	Température moyenne du mois le plus froid
Meier (1987). Norvège (70° 00 N, 26° 00 E). Altitude 580 m (Corgossjokka site). Pas de données précises sur les températures, seulement des données extrêmes pour la zone étudiée :		
+9 à +12 °C	–1 à –3 °C	–13 à –17 °C
Wramner (1973), Suède (68° 30' N, 20° 45' E). Altitude 600 m (Taavavuoma site). Précipitations : 450–500 mm		
	–3 à –4 °C	
Lagerback and Rodhe (1985), Suède, (\pm 69° 00' N, 21° 30' E). Altitude 700 à 800 m.		
	–3,5 °C (période 51–80)	
Akerman and Malmström (1986), Suède (\pm 68° 25' N, 18° 30' E). Altitude 850 à 1000 m (Rakaslako site).		
à 850 m +8,3 °C	–3,9 °C	–14,6 °C
à 950 m +7,2 °C	–4,4 °C	–15,1 °C

LES CONDITIONS D'APPARITION DES LITHALSES

Les conditions de température qui permettent l'apparition de lithalses paraissent étroites : Elles correspondent à une région où la **température du mois le plus chaud est inférieure ou proche de +10 °C** (isotherme qui correspond à la limite des arbres) et, comme nous l'avons montré dans un article précédent (Pissart, 1999b), elles ne peuvent se former que dans **la zone du pergélisol discontinu**. Si on retient ces critères, des régions favorables à l'apparition des lithalses peuvent être reconnues sur la carte du pergélisol de l'hémisphère nord (Brown *et al.*, 1997) que nous reproduisons partiellement sur la **figure 4**. Cette carte indique aussi la limite septentrionale des arbres (soit \pm l'isotherme de +10 °C du mois le plus chaud). Les régions où pourraient exister des lithalses sont en fait extrêmement limitées. La limite des arbres approche en Amérique du Nord la limite du pergélisol discontinu en Hudsonie (dont nous venons de parler longuement),

au nord du Grand Lac des Esclaves et à l'extrémité ouest de l'Alaska. Pergélisol discontinu et limite des arbres sont également proches l'une de l'autre en Laponie et en Russie de part et d'autre de l'Oural. Au delà du fleuve Ienisseï, en Sibérie, la limite des arbres s'étend dans la zone du pergélisol continu excluant ainsi la possibilité d'apparition de lithalses. Ce n'est que sur la presqu'île de Kamtchatka et dans une étroite zone côtière de Sibérie à proximité de la mer d'Okhotsk qu'il serait possible de trouver aussi des lithalses.

La Hudsonie et la Laponie où les lithalses sont connues actuellement seraient donc les principales régions où ces formes peuvent apparaître.

La recherche des températures du Dernier Dryas

LES DIFFICULTÉS

La reconnaissance des conditions climatiques qui ont existé autrefois n'est pas aisée. Si on a admis immédiatement que les périodes glaciaires ont correspondu à des périodes froides, il a été reconnu sans tarder que l'extension des glaciers ne traduisait pas seulement l'importance du refroidissement, mais pouvait aussi résulter d'une augmentation des précipitations. La répartition des glaciers actuels comparée avec des cartes des températures le fait apparaître clairement : des régions très froides ne sont pas de nos jours couvertes par des glaciers parce que les précipitations neigeuses y sont insuffisantes. Il en a été de même pendant les glaciations : ainsi une grande partie de la Sibérie n'a jamais été englacée malgré le froid très vif qui y a régné pendant les périodes glaciaires parce qu'il y faisait trop sec.

Nous considérerons ici ce qui s'est produit pendant le Dernier Dryas en détaillant spécialement le contenu d'une thèse qui a été présentée en novembre 1997 à l'Université d'Amsterdam par René Isarin et qui avait pour titre : "Le climat du nord-ouest de l'Europe pendant le Dryas récent. Une comparaison de reconstructions climatiques avec des expériences de simulation". A notre connaissance, ce travail établit le mieux les conditions qui ont existé chez nous pendant cette période.

Le Dryas récent (ou Dernier Dryas) est la période froide pour laquelle une reconstitution climatique est la plus aisée. C'est en effet la période froide la plus proche de nous (de l'ordre de 13000 ans pour le début) dont de ce fait subsistent de nombreux témoins. On dispose d'autre part pour cette période de l'outil de datation incomparable que constitue le Nous montrerons ci-dessous comment R. Isarin (1997) a approché les températures qui ont existé à cette époque. Déterminer l'importance des précipitations n'étant toujours pas réalisable aujourd'hui, nous n'aborderons donc pas les problèmes liés à cet aspect du climat.

Après avoir présenté la situation générale au Dernier Dryas, nous considérerons successivement comment des assemblages de végétation permettent de reconnaître les températures estivales (Isarin a aussi considéré les assemblages d'insectes) avant de montrer comment les températures moyennes annuelles peuvent être retrouvées d'après des structures périglaciaires spécifiques.

LE DERNIER DRYAS OU DRYAS RÉCENT

VUE GÉNÉRALE

Nous avons montré dans le dernier numéro de “Hautes Fagnes” (Pissart, 1999c) les incertitudes qui existent quant à l’âge du Dryas récent qui s’est étendu entre ± 13000 B.P. et ± 11600 ans B.P. D’après Joosten, 1994, cette période a été reconnue comme une période froide à la fin du 19^e siècle après la découverte d’abord au Danemark de feuilles d’une plante *Dryas octopetala* dans des sédiments lacustres. En 1891, Nathorst a présenté une vue générale de cette flore appelée “Dryas”, en Suède, au Danemark, en Allemagne, en Suisse, en Russie et en Angleterre. En 1901, Neuweiler a montré qu’au moment où cette flore se développait, il n’y avait pas d’arbres car la forêt avait reculé. Par la suite, cette brève période froide a été reconnue en Europe en de très nombreux endroits. Le retrait des glaciers qui, depuis le maximum de la dernière glaciation (± 20000 ans B.P.), reculaient et avaient libéré le nord de l’Allemagne, le Danemark et les détroits de la Mer Baltique, s’est arrêté du fait du refroidissement. Ils recouvraient cependant encore pratiquement toute la Scandinavie (la limite des glaciers à l’époque apparaît sur les **figures 5, 6 et 7**). Le niveau marin était toujours déprimé en raison de l’importance de la masse glaciaire stockée sur les continents et il se trouvait environ 70 m en dessous du niveau marin actuel (voir le tracé approximatif de la côte à cette époque sur les **figures 5, 6 et 7**). Vu le retour du froid, les phénomènes périglaciaires reprennent une grande activité dans toute l’Europe occidentale. En Pologne, en Allemagne et aux Pays-Bas, les phénomènes éoliens remanient les sables éoliens à nouveau exposés au vent à la suite de la disparition de la végétation. Les études botaniques attestent du recul de la forêt de pins et de bouleaux qui est remplacée par une végétation de tundra... Cette période du Dryas récent est donc unanimement reconnue comme froide et a été qualifiée d’“arctique, de sévère, de glaciale”, mais toutefois les auteurs ne se sont pas généralement pas risqués à fournir des valeurs chiffrées pour les températures qui existaient alors. Cependant, plusieurs auteurs mentionnés par Isarin (1997) estiment que le Dryas récent peut être divisé en deux phases. La première aurait été la plus froide et aurait fait place à un climat un peu plus chaud après 10500 ans ¹⁴C B.P. La thèse d’Isarin s’efforce de préciser quelles étaient ces températures.

LES TEMPÉRATURES D’ÉTÉ AU DERNIER DRYAS

Le principe utilisé pour déterminer les températures d’été est la relation entre la distribution des plantes et la température selon une thèse défendue par Iversen dès 1944. Les arbres et les plantes exigent en effet une température d’été minimum pendant leur période de croissance pour fleurir et se reproduire.

Les plantes peuvent ainsi être des indicateurs de la température d’été. La limite des arbres correspond approximativement à l’isotherme de +10 °C du mois le plus chaud. L’intensité du gel d’hiver n’a pas une influence déterminante sur cette limite, comme le montre le fait que le pôle du froid de l’hémisphère nord, Oimiakon en Sibérie, est dans la forêt boréale. Le climat continental extrême qui y existe est responsable, en effet, non seulement d’hivers très froids, mais aussi d’étés très chauds.

*Figure 5. Répartition actuelle en Europe occidentale de *Typha latifolia* et températures moyennes de juillet pour la période 1931–1960 (Isarin, 1997, p. 63).*

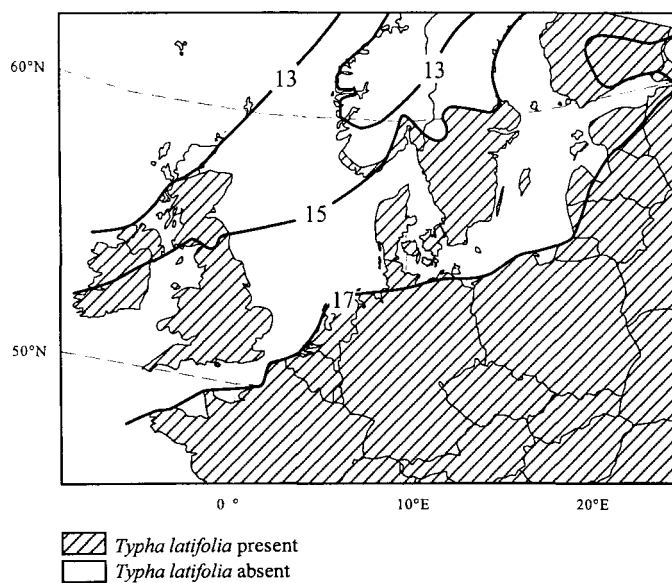


Figure 6. Répartition en Europe occidentale de *Typha latifolia* pour la première partie du Dernier Dryas (Isarin, 1997, p.70).

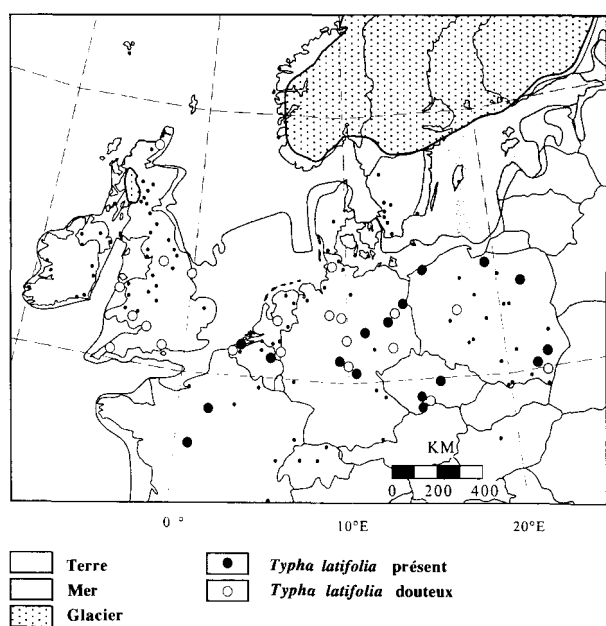
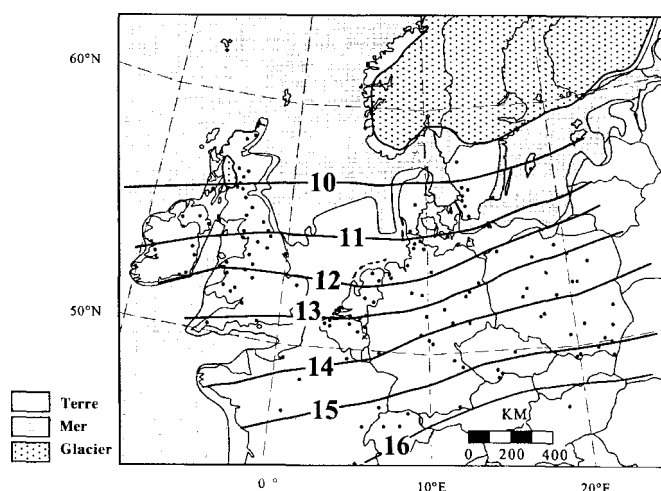


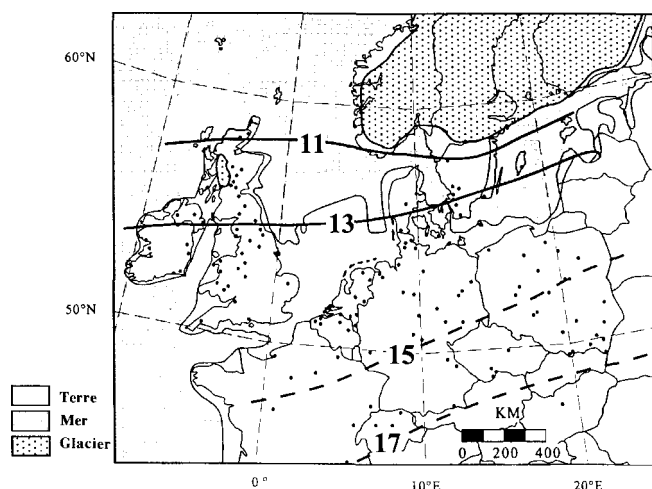
Figure 7. Répartition probable de la température moyenne minimum de juillet au niveau de la mer pour la première partie du Dryas récent (Isarin, 1997, p. 69).



Mais il vaut mieux reproduire les précisions formulées par Isarin lui-même sur la méthode qu'il a utilisée : "Quand les températures moyennes descendent en dessous d'une valeur critique, des plantes peuvent survivre, mais la reproduction s'arrête. Des températures défavorables soutenues conduiront éventuellement à la disparition d'espèces sensibles. En principe, la présence de pollen ou de macrofossiles d'une telle espèce dans un enregistrement" (une tourbière par exemple) "peut donc être utilisée comme un indicateur pour des conditions de température pour un instant et un endroit donné. La méthode postule que les espèces n'ont pas changé leurs tolérances climatologiques et que les espèces utilisées sont aujourd'hui en équilibre avec le climat. Il faut être conscient que quelques espèces montrent une relation claire avec les températures d'été, tandis que la distribution d'autres espèces peut être limitée par la température de la saison froide, par la sécheresse ou par le relief. La validité des indicateurs peut être éprouvée en comparant la distribution actuelle des espèces avec des cartes donnant des isothermes (par exemple Iversen, 1954), des altitudes (Kolstrup, 1979) ou, ce qui est plus précis, avec les données de stations météorologiques (par exemple Fassl, 1996)" (Isarin, 1997, p. 61).

Les plantes peuvent de la sorte fournir des indications climatiques intéressantes pour les époques où on est capable de retracer leur répartition. La valeur du travail d'Isarin que nous rapportons ici résulte du fait qu'il a réuni 140 diagrammes polliniques et observations de macrofossiles provenant de toute l'Europe occidentale pour proposer des températures. Isarin donne la liste de 28 espèces de plantes avec leur température minimum de juillet. La méthode mise en oeuvre sera illustrée ici par les restes de *Typha latifolia* (plante du bord des étangs dite roseau-massue ou massette dont les fleurs forment un épi compact d'aspect brun et velouté) dont la température moyenne minimum de juillet est de 13 °C. La **figure 5** présente la distribution actuelle de *Typha latifolia* et la température de juillet pour la période de 1931–1960. La **figure 6** donne la distribution de *Typha latifolia* pendant la première partie du Dryas récent. Cette figure montre comment ont été établies les cartes des températures de juillet pendant la première partie (**figure 7**) et la seconde partie (**figure 8**) du Dryas récent.

Figure 8. Répartition probable de la température moyenne minimum de juillet au niveau de la mer pour la deuxième partie du Dryas récent (Isarin, 1997, p. 72).



Les isothermes dessinées sur les **figures 7 et 8** ont été ramenées au niveau de la mer en considérant un gradient uniforme de température de 0.6 °C par 100 m. Ce qui signifie que si l'on veut tirer de ces cartes une estimation de la température qui existait au sommet du plateau des Hautes Fagnes, soit à 700 m d'altitude, il faut retrancher au chiffre lu sur ces documents la valeur de 4,2 °C.

Il convient de se rapporter aux commentaires d'Isarin pour apprécier la validité des cartes proposées. Nous ne pouvons pas, dans le cadre du présent article, entrer dans le détail de ces considérations. C'est évidemment le grand nombre de sites pris en compte qui assure à ces cartes leur crédibilité.

LES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES AU DERNIER DRYAS

C'est à partir d'observations complètement différentes que des températures moyennes annuelles ont été proposées pour le Dernier Dryas (R. Isarin, 1997). Depuis longtemps, on s'efforce en effet d'utiliser les traces de pergélisol pour retrouver les températures moyennes annuelles. Le premier essai avait été tenté par Poser en 1948 pour le maximum du froid de la dernière glaciation, période que d'autres auteurs (Kaiser, 1960 ; Maarleveld, 1976 ; Washburn, 1980 ; Velitchko, 1982) ont aussi considérée parce que on pouvait s'affranchir pour ce moment d'une datation fine, en établissant seulement que les phénomènes trouvés étaient apparus au cours de la dernière glaciation.

Les phénomènes considérés, sont ceux qui témoignent de la présence d'un pergélisol (Pissart, 1987 ; Vandenberghe et Pissart, 1993). Parmi ceux-ci trois types de phénomènes ont été considérés par Isarin, à savoir les fentes de gel à remplissage de glace, les buttes périglaciaires et les cryoturbations.

Les fentes de gel à remplissage de glace sont des fentes de retrait thermiques, c'est à dire des fissures qui apparaissent à la partie supérieure du sol lorsque, en hiver, la température est très basse et que le sol, en se refroidissant, se contracte. Un réseau polygonal de fentes de gel apparaît alors. Les fissures béantes vont au printemps se remplir d'eau descendue depuis la surface et cette eau va se transformer en glace. Si le sol ne dégèle pas l'été, c'est à dire s'il existe un pergélisol, une veine de glace verticale va se conserver dans le sol. La fissure, s'ouvrant de

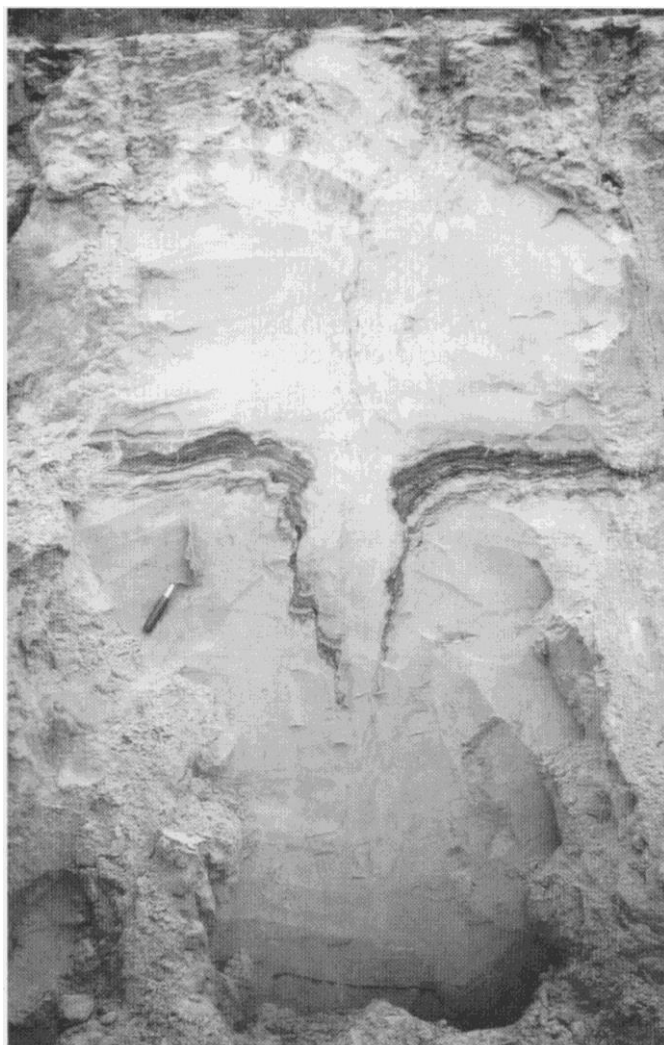
nouveau à la même place l'hiver suivant, va s'élargir progressivement et millimètres par millimètres un coin de glace va apparaître (**Figure 9**). Ces coins de glace apparaissent de diverses manières en surface. Il est donc indispensable qu'un pergélisol existe pour que des fentes de gel puissent se conserver et se développer. Les études réalisées en Alaska (Péwé, 1963) et en Sibérie (Romanovsky, 1985) ont établi que la température devait être bien en dessous de 0 °C pour que ces structures apparaissent. En Alaska, des températures moyennes annuelles de l'air de -6 à -8 °C seraient nécessaires. En Sibérie, une température moyenne annuelle de -2,5 °C serait indispensable dans les terres argileuses, tandis que -5,5 °C serait nécessaire dans des sables.

Figure 9. Fente de gel à remplissage de glace sur une berge de la Lena au nord de Yakutsk (longueur de la règle : 2 m).



La reconnaissance de traces de fentes de gel à remplissage de glace comme on en trouve souvent chez nous (**Figure 10**) constitue ainsi un critère établissant l'existence d'un pergélisol.

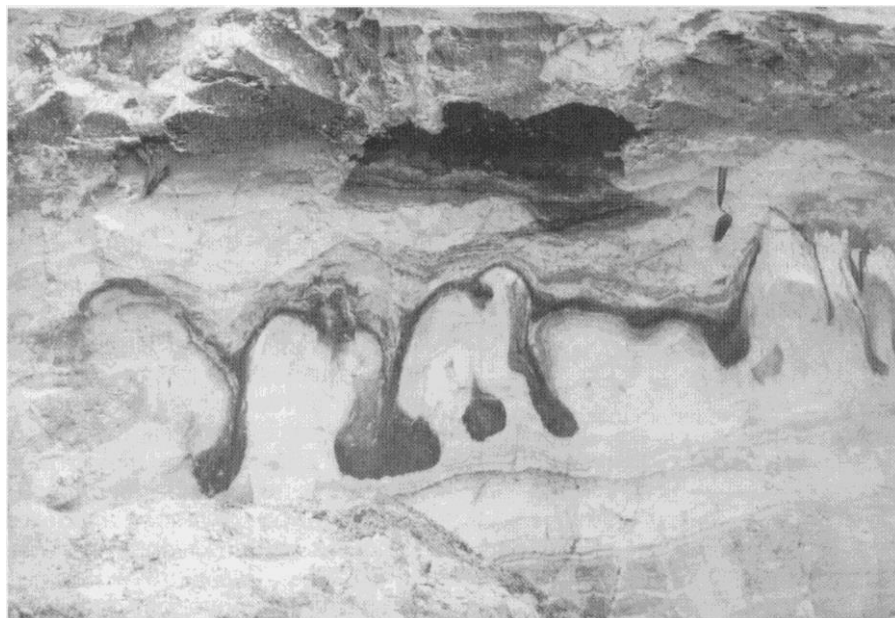
Figure 10. Moulage d'une fente de gel à remplissage de glace apparue pendant la dernière glaciation à Beernem près de Gand.



Les buttes périglaciaires, pingos en système ouvert et en système fermé, les lithaleses et les paises constituent d'autres phénomènes qui indiquent avec certitude l'existence d'un pergélisol. Il est évidemment nécessaire, pour pouvoir avancer des interprétations paléoclimatiques plus fines, de connaître l'origine des buttes dont on trouve les traces.

Enfin, les derniers phénomènes périglaciaires considérés par Isarin comme indicateurs d'un pergélisol, sont les cryoturbations. Il s'agit de déformations de couches qui sont attribuées à l'action du gel. Tous les chercheurs sont d'accord sur le fait que ces structures témoignent de l'existence d'un pergélisol lorsque la base de ces cryoturbations correspond à un plan horizontal (**Figure 11**). On pense alors que le développement vertical des structures a été limité par le sol toujours gelé que constituait le pergélisol. Personnellement, je n'ai jamais considéré comme indicateur d'un pergélisol les cryoturbations quelles que soient leurs tailles, ce que Isarin pour sa part accepte en suivant l'hypothèse de son directeur de thèse J. Vandenberghe (1988). Toutefois cette interprétation, pour moi douteuse, n'intervient guère dans la reconstitution paléoclimatologique du Dernier Dryas proposée par Isarin.

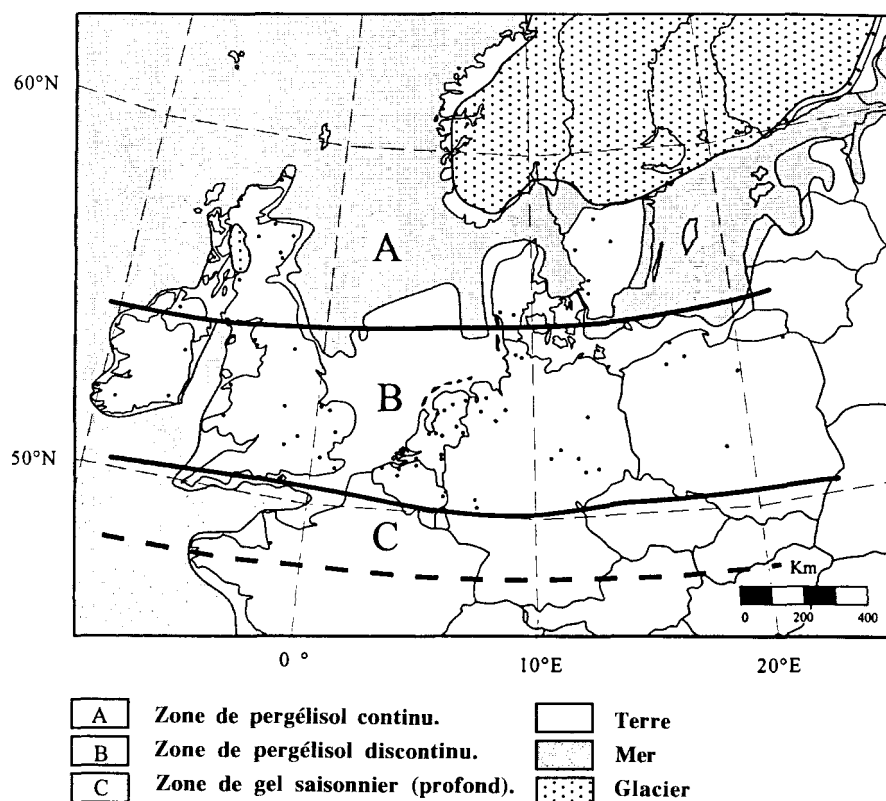
Figure 11. Cryoturbations montrant la déformation d'une couche tourbeuse à Beernem près de Gand. L'allure aplaniée de la partie inférieure de la cryoturbation la plus large pourrait témoigner du niveau où se trouvait le pergélisol lorsque ces structures sont apparues.



Il est évidemment fondamental que les phénomènes considérés soient effectivement datés du Dernier Dryas. Isarin a utilisé 87 sites où il considère que la datation "Dernier Dryas" des phénomènes périglaciaires est fiable. Parmi ceux-ci, on trouve les viviers des Hautes Fagnes qui sont justement considérés comme des traces de paises minérales (lithalses) représentatives de la zone de pergélisol discontinu. Il ne faut donc pas se cacher que les températures moyennes annuelles déterminant l'apparition des lithalses des Hautes Fagnes, données dans l'étude d'Isarin, sont en partie au moins déterminées par l'interprétation des viviers comme des restes de lithalses. Mais Isarin ne disposait pas des indications de température que nous avons données dans le présent article, tout en considérant que ces formes étaient caractéristiques du pergélisol discontinu.

Les cartes obtenues par Isarin sont reproduites sur les **figures 12 et 13**. La première de ces cartes donne la répartition de la distribution du pergélisol continu et discontinu dans l'Europe occidentale pendant le Dernier Dryas. C'est le résultat immédiat de l'interprétation des structures périglaciaires considérées. La seconde carte est une interprétation en chiffres des températures moyennes annuelles ramenées au niveau de la mer. Les températures en italiques sont les températures du mois le plus froid, en admettant que la courbe des valeurs mensuelles dessine une sinussoïde qui chevauche d'une manière égale la température moyenne annuelle (**Figure 14**). Autrement dit, on admet que la température du mois le plus froid s'écarte de la température moyenne annuelle d'une valeur semblable à l'écart qui sépare la température moyenne annuelle du mois le plus chaud, ce qui est le cas actuellement.

Figure 12. Répartition en Europe occidentale des zones de pergélisol continu et discontinu pendant le Dernier Dryas (Isarin, 1997, p. 54).



LES TEMPÉRATURES SUR LE PLATEAU DES HAUTES FAGNES PENDANT LE DERNIER DRYAS D'APRÈS LA THÈSE D'ISARIN (1997)

Les cartes que nous avons reproduites nous permettent, en considérant le gradient de température pour l'altitude de 0,6 °C par 100 m pris en compte par Isarin, de supposer que entre les altitudes de 500 et 700 m (où se trouvent les viviers des Hautes Fagnes), pour lesquelles les températures sont de 3,0 à 4,2 °C plus basses qu'au niveau de la mer, la température moyenne annuelle devait être de l'ordre de -5,0 à -6,2 °C, alors que la température du mois le plus chaud était de +9,3 à +10,5 °C. Comme l'écart entre la température moyenne annuelle et la température du mois le plus chaud est de 15,5 °C, la température du mois le plus froid devrait avoir été de -20,5 à -21,7 °C (**Figure 14**). Précisons que les phénomènes périglaciaires ne permettent pas de distinguer deux périodes pendant le Dernier Dryas, comme cela a été possible pour les températures d'été à partir des données botaniques.

Il ne faut pas se leurrer et croire que des températures aussi précises, données ici à une fraction de degré près, sont significatives. Les décimales doivent être oubliées pour ne garder que les ordres de grandeur. Il convient aussi de penser à la variabilité interannuelle des températures et conserver à l'esprit que, au cours du Dernier Dryas, les températures ont varié comme les données botaniques l'ont fait apparaître. Nous pensons que, de toute manière, le travail d'Isarin, qui a pris en compte un très grand nombre d'observations diverses, est certainement la meilleure approche paléoclimatique dont nous disposons aujourd'hui.

Figure 13. Isothermes de la température moyenne annuelle et estimation de la température moyenne du mois le plus froid (en italiques) au niveau de la mer pendant le Dernier Dryas (Isarin, 1997, p. 56).

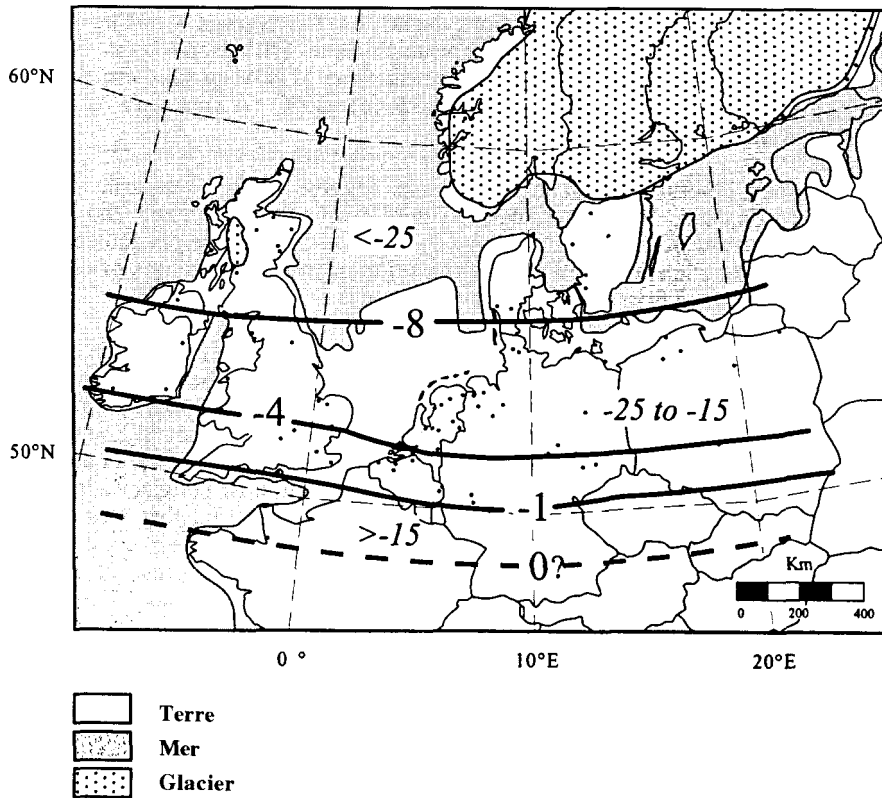
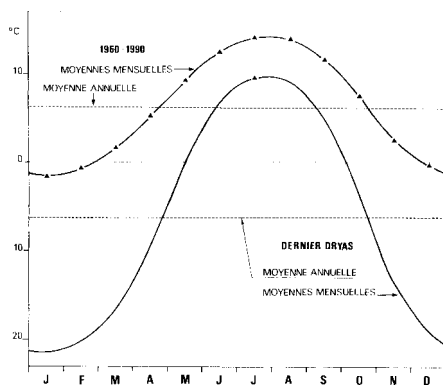


Figure 14. Comparaison entre les températures actuelles à la Baraque Michel et les températures supposées au Dernier Dryas. Comme les courbes sont des sinusoïdes, la température du mois le plus chaud et la température moyenne annuelle permettent de trouver la température moyenne du mois le plus froid. Les températures actuelles données sont celles de l'IRM (M. Vandiepenbeeck) pour la période 1960–1990.



Conclusions

Les températures considérées comme typiques de la région de l'est du Canada où les lithales sont nombreuses, sont très proches des températures trouvées par Isarin pour les altitudes comprises entre 500 et 700 m dans les Hautes Fagnes pendant le Dernier Dryas : températures moyennes annuelles de $-5,8$ à $-4,3$ °C en Ungava, $-5,0$ à $-6,2$ °C dans les Hautes Fagnes ;

températures moyennes du mois le plus chaud de +9,5 à +10,7 °C en Ungava et de +9,3 à +10,5 °C dans les Hautes Fagnes ; températures moyennes du mois le plus froid de -22 à -24 °C en Ungava et de -20,5 à -21,7 °C dans les Hautes Fagnes. Ces données confortent l'opinion que Isarin définit bien les conditions de température qui ont existé sur le Haut Plateau pendant le Dernier Dryas. Les températures obtenues pour le mois le plus chaud sont basées seulement sur des observations biologiques et ne prennent pas en compte les phénomènes périglaciaires dont les viviers sont les traces.

Les écarts sont plus grands lorsque les résultats sont comparés avec les données de Laponie, mais ils restent cependant raisonnables. Les températures trouvées sont en effet de -3 à -4 °C pour les températures moyennes annuelles, de +7 à +8 °C pour les températures moyennes de juillet et de -18 à -19 °C pour les températures moyennes de janvier. Il faut aussi considérer que la région où des lithalses ont été trouvées en Laponie se trouve à une très haute latitude (68 ° à 69 ° N), soit au delà du Cercle Polaire et que les conditions d'insolation y sont différentes de celles de Hudsonie où des lithalses sont observées entre 55 et 65 ° N. Cette dernière région est évidemment en latitude beaucoup plus proche des Hautes Fagnes qui se trouvent à une latitude de 50° 30' N.

Par rapport aux températures actuelles, le sommet du plateau des Hautes Fagnes a connu pendant le Dernier Dryas une baisse de la température moyenne du mois de janvier de l'ordre de 20 °C, alors que la température moyenne annuelle s'abaissait de 12 °C et la température moyenne de juillet ne descendait que de 5 °C. Les températures actuelles à la Baraque Michel ont été les suivantes pour la période 1960-1990 selon Monsieur M. Vandiepenbeeck de l'IRM (**Figure 14**) : moyenne de janvier -1,7 °C, moyenne de juillet : +14 °C, moyenne annuelle +6,2 °C (renseignement que nous a fourni le Professeur J. Alexandre, que nous remercions).

Les données climatiques de Hudsonie et aussi celles de Laponie nous apportent en outre une conclusion intéressante. Elles montrent en effet que les conditions climatiques favorables à l'apparition des lithalses sont étroites, ce qui expliquerait que des lithalses actuelles et aussi des traces fossiles de ces formes ont été rarement observées ailleurs dans le monde, ce dont nous parlerons dans un prochain article. Avec les viviers, le plateau des Hautes Fagnes comprend ainsi une morphologie vraiment exceptionnelle qui continuera à retenir l'attention des spécialistes des phénomènes périglaciaires car elle représente les traces les plus spectaculaires du climat rigoureux que l'Europe occidentale a subi il y a environ 13000 ans. La densité des traces de lithalses qui s'y trouvent est actuellement unique dans le monde et seul le réchauffement climatique annoncé pourrait faire apparaître en Hudsonie des champs de traces de lithalses semblables à celles que nous connaissons sur le Haut Plateau.

Dans le prochain numéro, nous examinerons comment une modification de la circulation océanique a vraisemblablement engendré le refroidissement du Dernier Dryas.

Bibliographie

Ahman, R., 1977 - Palsar i Nordnorge (Summary: Paisas in Northern Norway). *Meddelanden fran Lunds Universitets Geografiska Institution*, 78, 156 p.

- Akerman, H.J. and Malmström, B., 1986. Permafrost mounds in the Abisko area, northern Sweden. *Geografiska Annaler*, 68A(3): 155–165.
- Allard, M., Seguin, M. K. and Lévesque, R., 1986. Paisas and mineral permafrost mounds in northern Québec. *International Geomorphology*. Part II. (V. Gardiner edit.) J. Wiley and Sons Ltd.: 285–309.
- Allard, M. and Seguin, M., 1987. The holocene evolution of permafrost near the tree line, on the eastern coast of Hudson Bay (Northern Quebec). *Canadian Journal of Earth Science*, 24: 2206–2222.
- An, W. & Allard, M., 1995. A mathematical approach to modelling paisa formation: insights on processes and growth conditions. *Cold Regions Science and Technology*, 23: 231–244.
- Brown, J., Ferrians Jr, O.J., Heginbottom, J.A. and Melnikov, E.S., 1997. *Circum-arctic map of permafrost and ground-ice conditions*. Circum-Pacific map series – 45, U.S. Geological Survey 1/10,000,000.
- Fassl, K., 1996. Die Bewertung von Zeigerarten in europäischen Pollendiagrammen für die Rekonstruktion des Klimas im Holozän. *Palaoklimaforschung*, 22, Stuttgart: Fischer Verlag.
- Isarin, R.F.B., 1997. *The climate in northwestern Europe during the Younger Dryas. A comparison of multi-proxy climate reconstructions with simulation experiments*. Drukkerij Elinkwijk b.v., Utrecht, 160 p.
- Iversen, J., 1944. *Viscum, Hedera and Ilex as climate indicators*. *Geologiska Foreningens in Stockholm Forhandlingar*, 66: 463–483.
- Iversen, J., 1954. The Late-Glacial flora of Denmark and its relation to climate and soil. *Danmarks Geologiske Undersogelse*, 5, 7C: 126.
- Joosten, J.H.J., 1994. Between Diluvium and Deluge: the origin of the Younger Dryas Concept. *Geologie en Mijnbouw*, 74: 237–240.
- Kolstrup, E. 1979. Herbs as July temperature indicators for parts of the pleniglacial and late glacial in The Netherlands. *Gologie en Mijnbouw*, 58(3): 377–380.
- Lagerbach, R. and Rohde, L., 1985. Pingos in northernmost Sweden. *Geografiska Annaler*, 67a(3–4): 239–245.
- Lagarec, D., 1976. Etude géomorphologique de palses dans la région de Fort Chimo, Nouveau Québec, Canada. *Cahiers géologiques*, 92: 153–163.
- Lavoie, C. and Payette, S., 1994. Recent fluctuations of the lichen-spruce forest limit in subarctic Québec. *Journal of Ecology*, 82: 725–734.
- Maarleveld, G., 1976. Periglacial phenomena and the mean annual temperature during the last glacial time in the Netherlands. *Biuletyn Peryglacjalny*, 26: 57–78.
- Meier, K.-D., 1987. Studien zur periglaziären Landschaftsformung in Finmark (Nord-norwegen). *Jahrbuch des geographischen Gesellschaft zu Hannover*. Sonderheft 13, Hannover, 298 p.
- Péwé, T., 1966. Paleoclimatic significance of fossil ice wedges. *Biuletyn Peryglacjalny*, 15: 65–73.
- Payette, S. and Filion, L., 1993. Origin and significance of subarctic patchy podzolic soils and paleosols. *Arctic and Alpine research*, 25(4): 267–276.
- Pissart, A., 1987a. Weichselian periglacial structures and their environmental significance Belgium, the Netherlands, and Northern France. *Periglacial Processes and landforms in Britain and Ireland*. J. Boardman (edit.), Cambridge University Press: 77–85.
- Pissart, A., 1987b. *Géomorphologie Périglaciaire – Texte des leçons de la Chaire Francqui belge 1987*. Chapitre 12. Les indicateurs paléoclimatiques périglaciaires et leurs enseignements. Edition du laboratoire de Géomorphologie et Géologie du Quaternaire de l'Université de Liège, 135 p.

- Pissart, A. & Gangloff, P., 1984. Les paises minérales et organiques de la vallée de l'Aveneau, près de Kuujuaq, Québec subarctique. *Géographie physique et Quaternaire*, 38(3): 217–228.
- Pissart, A., Harris, S., Prick, A. & Van Vliet-Lanoë, B., 1998. La signification paléoclimatique des lithalses (paises minérales). *Biuletyn Periglacialny*, 37: 141–154.
- Pissart, A., 1999a. Les traces de buttes cryogènes des Hautes Fagnes. Gotes, viviers, pingos, paises, lithalses. Pourquoi la terminologie a-t-elle changé ? *Hautes Fagnes*, 1999(2): 44–50.
- Pissart, A., 1999b. Les viviers des Hautes Fagnes. Le mode de formation des paises et des lithalses. *Hautes Fagnes*, 1999(3): 75–83.
- Pissart, A., 1999c. Les viviers des Hautes Fagnes. Les fouilles réalisées, la formation des remparts, leur âge. *Hautes Fagnes*, 1999(4): 99–109.
- Poser, H., 1948. Boden-und Klimaverhä in Mittel-und Westeuropaltnisse während des Würmeiszeit. *Erdkunde*, 2: 53–68.
- Romanovsky, N.N., 1985. Distribution of recently active ice and soil wedges in the USSR. *Field and theory. Lectures in geocryology*. 154–165. Edited by M. Church and O. Slaymaker, 213 p.
- Saint-Laurent, D. et Filion, L., 1992. Interprétation paléoécologique des dunes à la limite des arbres, secteur Nord-Est de la Mer d'Hudson, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 46(2): 209–220.
- Svensson, H., 1969. A type of circular lakes in northernmost Norway. *Geografiska Annaler*, 51A(1-2): 1–12.
- Vandenbergh, J. et Pissart, A., 1993. Permafrost changes in Europe during the last glacial. *Permafrost and Periglacial Processes*, 4(2): 121–135.
- Worsley, P., Gurney, S.D., & Collins, P.E.C., 1995 – Late Holocene “mineral paisas” and associated vegetation patterns: a case study fom lac Hendry, Northern Québec, Canada and significance for European Pleistocene thermokarst. *Quaternary Science Reviews*, 14: 179–192.
- Washburn, A.L., 1980. Permafrost features as evidence of climatic change. *Earth Science review*, 15: 327–401.
- Wramner, P., 1972. *Palslika bildningar I mineraljord. Nagra iakttagelser fran Taavavuoma, Lappland* (Summary: Palsa-like formation in mineral soil. Some observations from Taavavuoma, Swedish Lapland.). Göteborgs Universitet Naturgeografiska Institutionen, Guni rapport 1, 60 p.
- Wramner, P., 1973. *Palsmyrar I Taavavuoma, Lappland* (Summary: Paises bogs in Taavavuoma, Swedish Lapland). Goteborg Universitets Naturgeografiska Institutionen, Guni rapport 3, 140 p.