

## LES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES ESSENTIELS LIÉS AU GEL, LES STRUCTURES PÉRIGLACIAIRES QUI EN RÉSULTENT ET LEUR SIGNIFICATION CLIMATIQUE (\*)

par A. PISSART (\*\*)

(23 figures dans le texte)

### ABSTRACT

The author examines the effects of three physical phenomena produced in the ground by freezing :

#### I. *Thermal contraction.*

After summarizing the physical laws accounting for the appearance of frost cracks, the author groups them into three categories :

- a. frost wedges filled with ice,
- b. frost wedges filled with sand and ice, forming in the active layer and in the permafrost, (the sand wedges of Pewe),
- c. frost wedges with a purely mineral filling, appearing in the active layer or in areas without permafrost.

The characteristics of each of these types of frost wedge are enumerated in the hope that they may be recognized in the fossil form. The author insists that all frost wedges do not necessarily imply the existence of permafrost at the time of their formation.

#### II. *The formation of segregated ice.*

Following a short account of the accepted hypothesis of the origin of segregated ice, several consequences are considered :

- a. the uplift of the soil by frost,
- b. its supersaturation on thawing, (producing congelifluction),
- c. its dessication at depth, (of interest in that it produces small scale polygonal cracks),
- d. size sorting, (the movement of fines in the same direction as the frost wave, and of coarser material in the opposite direction),
- e. the change in the orientation of pebbles moved by frost, (the origin of vertical stones).

The appearance of all these phenomena by no means requires the existence of permafrost.

#### III. *The increase in the volume of water as it changes to ice.*

The phase diagram of H<sub>2</sub>O enables us to understand three important periglacial phenomena :

- a. mounds of injection ice which may form not only in an open system (Alaska type)

(\*) Lecture présidentielle présentée à la séance du 7 octobre 1969. Manuscrit déposé le 12 janvier 1970.

(\*\*) Chargé de cours associé à l'Université de Liège, place du XX août, 7, 4000 Liège.

(\*\*\*) Je remercie vivement le Professeur P. MACAR qui a eu la bienveillance de relire et de critiquer le manuscrit de cet article.

and in a closed system (Mackenzie type), but also in a temporary closed system produced each winter. Pingos indicate the existence of permafrost but the climatic conditions under which they form vary considerably.

- b. periglacial involutions. After summarizing the various theories that have been proposed for their origin, a new explanation for cryoturbations which affect beds of widely differing grain size is offered : the plastic deformation of already frozen ground by the freezing of capillary water. This hypothesis, based on laboratory experiments which consisted mainly in the measurement of pressure within the soil as it freezes, means that periglacial involutions are not necessarily an indication of the presence of permafrost.
- c. gelifraction, for which the author stresses the fundamental importance of the freezing of capillary water in the fissures in the rock. This takes place below 0° C when the fissure is already closed by ice formed at a higher temperature.

### RÉSUMÉ

L'auteur examine les effets des trois mécanismes physiques les plus importants se produisant dans le sol sous l'action du gel :

#### I. *Le retrait thermique.*

Après avoir rappelé comment se forment les fentes de gel, l'auteur distingue les fentes de gel à remplissage de glace, les fentes de gel à remplissage de sable et de glace et les fentes de gel à remplissage uniquement minéral. Les caractères propres à chacune de ces structures sont définies.

#### II. *La formation de glace de ségrégation.*

Après un rappel de l'explication classique de l'apparition de glace de ségrégation, les multiples conséquences de ce phénomène sont examinées : congélifluxion, dessiccation en profondeur, triage granulométrique, cailloux dressés.

#### III. *L'augmentation de volume de l'eau se transformant en glace.*

Le diagramme des phases de H<sub>2</sub>O permet de bien comprendre trois phénomènes périglaciaires importants :

- a. les buttes de glace d'injection pour lesquelles trois origines distinctes sont rappelées,
- b. les involutions périglaciaires dont une genèse possible par congélation d'eau capillaire comprise au sein du sol est établie par des expériences de laboratoire,
- c. la gelifraction, mécanisme dans lequel le gel de l'eau capillaire joue aussi, selon l'auteur, un rôle fondamental.

### TABLE DES MATIÈRES

Pages

#### INTRODUCTION

L'importance des phénomènes périglaciaires au Quaternaire. La nécessité des travaux expérimentaux pour connaître la genèse des formes et des structures . . . . . 9

#### I. LE RETRAIT THERMIQUE ET LES FENTES DE GEL

A. *Principes physiques et processus de formation des fentes de gel à remplissage de glace* . . . . . 10

B. *Les fentes de gel à remplissage de sable et de glace se poursuivant dans la zone active et dans le pergélisol* . . . . . 11

C. *Les fentes de gel à remplissage minéral développées dans un milieu dégelant chaque année :*

1. uniquement dans la zone active surmontant le pergélisol . . . . . 11
2. à la partie supérieure du sol sans pergélisol en profondeur . . . . . 17

D. *Conclusion* : Les fentes de gel fossiles ne sont pas nécessairement l'indice d'un pergélisol. Caractères permettant de reconnaître les fentes de gel à remplissage minéral . . . . . 18

II.	L'APPARITION DE LA GLACE DE SÉGRÉGATION ET SES MULTIPLES CONSÉQUENCES	
A.	<i>Principes physiques.</i> Influences de la vitesse, de la direction de progression du gel, de la granulométrie du sol . . . . .	19
B.	<i>Les conséquences directes et indirectes de l'apparition de glace de ségrégation</i>	
	1. soulèvement du sol par le gel . . . . .	21
	2. augmentation de la teneur en eau de la partie supérieure du sol . . . . .	22
	3. modification de la structure du sol . . . . .	22
	4. dessiccation en profondeur . . . . .	23
	5. triage granulométrique :	
	a) mouvement des particules fines . . . . .	24
	b) mouvement des cailloux . . . . .	25
	6. redressement des cailloux dans le sol . . . . .	27
C.	<i>Conclusion</i> . . . . .	29
III.	L'AUGMENTATION DE VOLUME DE L'EAU SE TRANSFORMANT EN GLACE	
A.	<i>Principes physiques.</i> Le diagramme des phases de H <sub>2</sub> O . . . . .	29
B.	<i>Les buttes de glace d'injection : les pingos</i> . . . . .	30
C.	<i>Les involutions périglaciaires</i> . . . . .	33
	1. Nomenclature . . . . .	34
	2. Hypothèses génétiques	
	a) les involutions non périglaciaires . . . . .	34
	b) les involutions liées indirectement à l'action du gel . . . . .	35
	c) les involutions liées directement à l'action du gel . . . . .	35
	d) conclusion . . . . .	37
	3. Expériences de laboratoire. Mesures de pressions au sein de masses de boue se congelant . . . . .	37
	a) en système ouvert . . . . .	37
	b) en système fermé . . . . .	40
	c) jauge de pression prise au sein du sol gelé . . . . .	40
	4. Conclusion . . . . .	43
D.	<i>La gélifraction</i> . . . . .	44
IV.	CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .	45
	BIBLIOGRAPHIE . . . . .	46

## INTRODUCTION

L'importance géologique et géomorphologique de l'action du gel n'est pas discutée. Elle produit des formes particulières (talus d'éboulis, traces de pingos, ...) des dépôts divers (éboulis ordonnés, dépôts de congélifluxion, ...) et des structures variées (fentes de gel, involutions, ...). L'ensemble constitue l'objet des recherches périglaciaires. L'importance de ces études est due à la fois à l'efficacité des processus que le gel met en action et à l'étendue du territoire où le froid a laissé des traces. En limitant les régions périglaciaires aux contrées qui ont actuellement un pergélisol, c'est-à-dire un sol perpétuellement gelé, ce domaine périglaciaire couvre maintenant le 1/5 des terres émergées. Au cours du dernier million d'années, les refroidissements responsables des glaciations ont agrandi son extension au point que, au moins temporairement, le 1/3 des terres émergées en ont fait partie. Sur cet immense territoire qui comprend la majorité des régions tempérées actuelles, l'action du gel a joué un rôle considérable, aussi bien dans le façonnement des

dépôts quaternaires que dans le modelé, et il intéresse de ce fait autant le géologue que le géomorphologue.

Dans le domaine des structures périglaciaires, c'est-à-dire des déformations diverses que les dépôts ont subi sous l'action du gel après leur mise en place, un progrès considérable est en train de s'accomplir. Ce progrès est dû non seulement aux observations de terrain qui sont de plus en plus nombreuses dans les régions arctiques, mais aussi au développement des recherches expérimentales. Les expériences établissent en effet l'existence de mécanismes physiques, parfois insoupçonnés, qui remplacent peu à peu les hypothèses gratuites formulées jusqu'ici. Le plus grand nombre de travaux se rapportant à ces structures étaient, en effet, jusqu'il y a peu, des descriptions suivies d'essais d'interprétation. Souvent plusieurs hypothèses génétiques étaient envisagées et comme aucune vérification expérimentale n'était réalisée, elles se sont multipliées en engendrant une grande confusion. Le remarquable travail de synthèse accompli par A. L. WASHBURN (1956) pour rassembler et comparer les différentes hypothèses émises pour expliquer les sols polygonaux, a démontré la complexité et la confusion existant dans ce domaine. Dans l'espoir de voir plus clair, il nous paraît utile de prendre le problème par l'autre bout : à la place de commencer par décrire des structures, avant de considérer les phénomènes qui en sont responsables, nous envisagerons d'abord les mécanismes physiques que produit l'action du gel, et nous définirons ensuite les structures périglaciaires que ces mécanismes peuvent engendrer. De la sorte, nous considérerons successivement, dans le présent exposé, trois groupes de phénomènes physiques différents, à savoir :

1. les phénomènes de rétraction thermique,
2. les phénomènes liés à l'apparition de la glace de ségrégation,
3. les phénomènes qui sont dus à l'augmentation de volume de l'eau se transformant en glace.

## I. LE RETRAIT THERMIQUE ET LES FENTES DE GEL

### A) Principe physique et processus de formation des fentes de gel à remplissage de glace.

L'abaissement de la température dans les sols gelés entraîne une rétraction thermique d'autant plus importante qu'ils sont riches en glace. En effet, le coefficient linéaire de rétraction thermique de la glace est cinq fois supérieur à celui de la majorité des silicates. Ce retrait thermique s'effectue au sein d'un sol rigide car gelé et cimenté par la glace. Il détermine, si la température s'abaisse suffisamment, la fracturation du sol en de grands blocs limités par des fissures étroites de plus en plus fines en profondeur et dénommées fentes de gel. Au moment du dégel, ces fissures se remplissent d'eau qui, en arrivant dans le sol gelé, ne tarde pas à se congeler et à former des coins de glace. Lorsque la température s'élève, les coins de glace s'opposent au retour des parois de la fissure dans leur position première et le sol voisin subit une déformation plastique. Lors du refroidissement hivernal suivant, de nouvelles fissures de rétraction thermique apparaissent. Elles se localisent généralement à l'emplacement des coins de glace existants. Se remplissant à nouveau d'eau au moment du dégel, les *fentes de gel à remplissage de glace* s'épaississent peu à peu (fig. 1). Elles peuvent atteindre de la sorte 6 à 8 m de largeur et, par croissance syngénétique, 20 à 30 m de profondeur (Schoumsky, 1955).

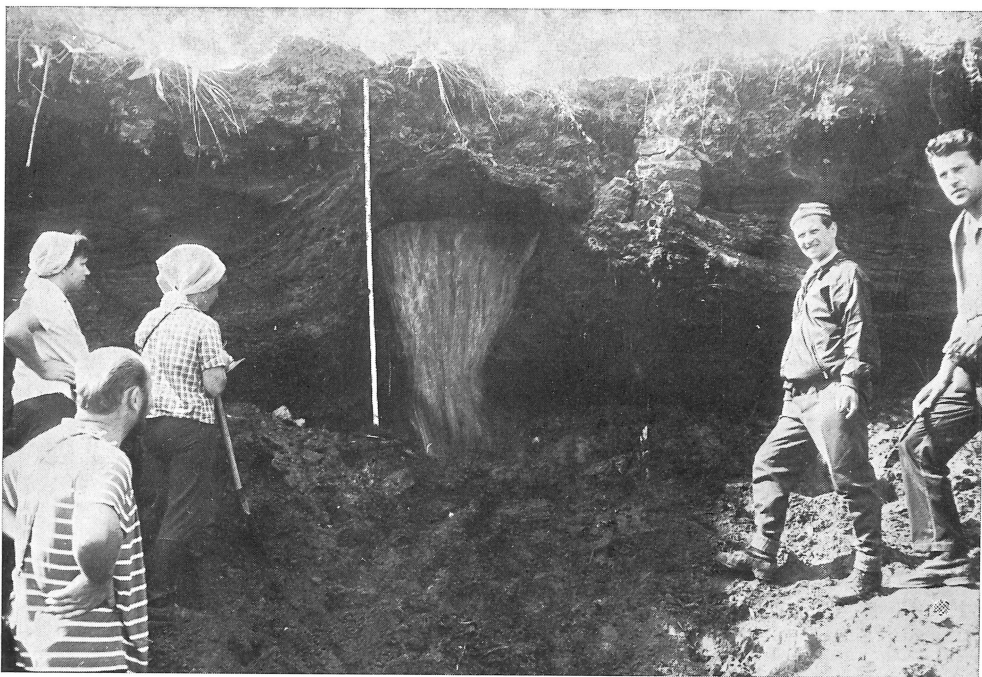


Fig. 1. — Fente de gel à remplissage de glace dans la plaine alluviale de la Lena, environ 120 Km au N de Yakoutsk (Sibérie).

Ce processus, actif dans toutes les roches meubles de la tundra, découpe le sol en de grands polygones qui ont été appelés « polygones de toundra » ou « polygones de fentes de gel ». Leur aspect est variable selon leur stade d'évolution. Au moment de la croissance des coins de glace, les bords des fissures se relèvent et donnent naissance à des polygones dont le centre est déprimé (low center polygons) (fig. 2).



Fig. 2. — Polygones de fentes de gel à remplissage de glace dont le centre est déprimé près de Mould Bay. (Ile Prince Patrick, Arctique Canadien, 76° lat. N.).

Au moment de leur fusion, qui peut provenir soit d'un réchauffement climatique, soit d'un simple phénomène thermokarstique (par exemple, à la suite de l'érosion d'une partie de la couche minérale recouvrant le coin de glace), les polygones prennent un aspect bombé; les coins de glace donnent naissance à des dépressions au sein desquelles le sol voisin s'affaisse (high center polygons).

Quand toute la glace a fondu, il subsiste généralement dans le sol une structure en coin résultant du remplissage par la matière minérale de l'espace qui était occupé par la glace. Ces moulages (pseudomorphoses, comme disent les auteurs russes) de fentes de gel sont fréquents dans les pays ayant subi au Quaternaire un climat froid rigoureux. S'il s'agit bien de substitution de coins de glace, elles apportent d'ailleurs la preuve de l'existence d'un pergélisol, c'est-à-dire d'une température moyenne annuelle inférieure à 0° C au moment de l'apparition du coin de glace. Il est extrêmement difficile d'apporter une plus grande précision quant aux températures moyennes qui existaient alors. Rappelons seulement que T. L. PEWE (1966) a montré qu'en Alaska, les fentes de gel étaient actuellement actives là où la température moyenne annuelle était, selon les conditions, inférieure à — 6 ou à — 8° C.

Pour bien interpréter les structures de fente de gel fossiles, il convient de ne pas oublier les remarques suivantes :

a) le remplissage contient non seulement du matériel apporté postérieurement à l'apparition du coin de glace, mais encore ce qui constituait la zone active au moment de sa croissance. Or dans certains sols relativement secs, cette zone active peut atteindre 2 m.

b) la fusion du coin de glace, en tout ou en partie, peut résulter de processus thermokarstiques (déclanchés par exemple par une modification dans la couverture végétale) et ne provient pas toujours d'un réchauffement climatique.

c) un temps très long peut s'écouler entre l'apparition du coin de glace et sa fusion. Il peut rester inactif dans le sol pendant des milliers d'années.

d) la fusion de la glace et la descente du matériel surincombant sont susceptibles de provoquer de considérables modifications de forme du coin originellement occupé par la glace.

Ce schéma, à première vue assez simple, est compliqué par l'existence de fentes de gel à remplissage minéral qui n'ont pas toujours la même signification que les fentes de gel à remplissage de glace. Il s'agit de coins remplis immédiatement par des sédiments (sables ou graviers généralement) et au sein desquels il n'a jamais existé de glace. Plusieurs articles ont été publiés par des chercheurs russes à propos de ces structures qu'ils ont dénommées « soil veins » ou « ground veins ». Actuellement, une confusion assez grande semble exister à leur sujet. Dans les structures décrites jusqu'à présent, il paraît possible de distinguer trois types de fentes de gel à remplissage minéral dont les conditions d'apparition ne sont pas identiques.

## B) Les fentes de gel à remplissage de sable et de glace se poursuivant dans la zone active et dans le pergélisol.

Les « sand-wedges » décrits en 1959 par T. L. PEWE dans l'Antarctique (fig. 3) appartiennent à ce premier type (\*). Nous avons reconnu sur l'île Prince Patrick

(\*) Il est vraisemblable que les « frost cracks » décrits par A. L. WARBURN (1947, p. 102) sur l'île Victoria appartiennent à cette catégorie de fentes de gel. Ceux décrits par D. M. HOPKINS, T. N. V. KARLSTROM and others, en Alaska (1955, p. 139) ont été

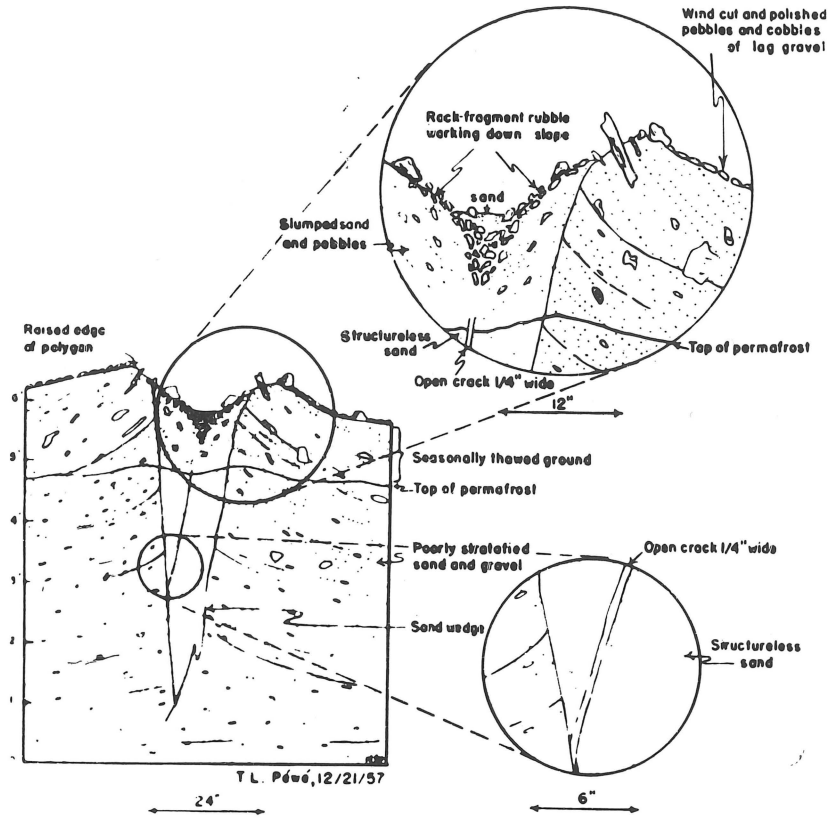


Fig. 3. — Coupe dans un « sand wedge » de la vallée sèche de Taylor, Mc Murdo Sound, Antarctica.  
 Extrait de Péwé, 1959, fig. 3, p. 549.

(Arctique Canadien) des structures identiques (fig. 4) sous un climat très semblable à celui de Mc Murdo (Pissart, 1968). Ce sont des coins de sable cimenté de glace qui descendent dans le pergélisol. Outre la présence d'une quantité importante de matières minérales dans le remplissage, ils se différencient des fentes de gel à remplissage de glace par la continuité de leur structure au travers de toute la zone active, jusqu'à la surface. En été, dans la zone active n'existe bien entendu plus de glace. Le remplissage sableux présente parfois un litage vertical peu distinct qui peut être accentué dans le permafrost par la présence de la glace. En outre, le remplissage peut montrer une diminution avec la profondeur de la taille des éléments caillouteux. Ce triage résulte de ce que la descente des particules dans les fissures est d'autant plus rapide que les éléments sont petits. Ces litage et triage doivent subsister après la disparition du permafrost.

observés aussi bien dans les régions ayant un pergélisol que dans des régions où il n'existe pas. Ils appartiendraient aux deux catégories de fentes de gel à remplissage minéral que nous distinguons ici. En l'absence de coupe, l'aspect extérieur des polygones ne permet pas de les reconnaître.

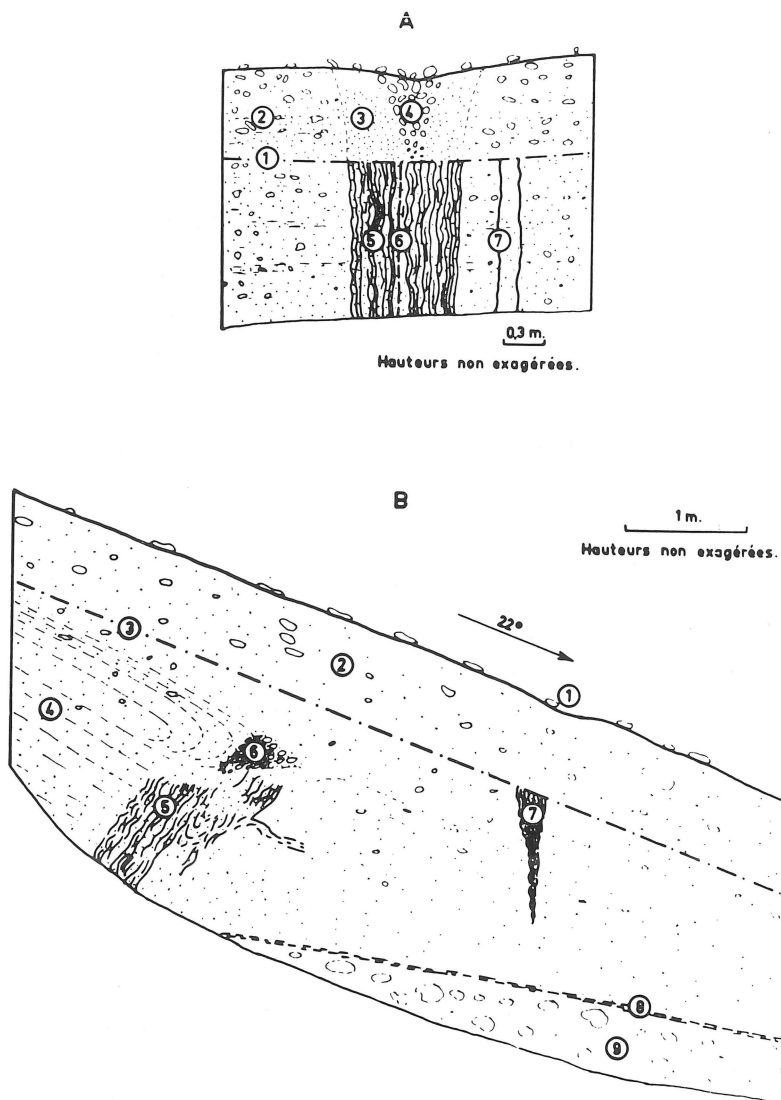


Fig. 4. — Coupes dans des fentes de gel à remplissage de sable et de glace de l'île Prince Patrick (76° lat. N, arctique canadien).

A. Sur une terrasse horizontale : 1. limite supérieure du sol gelé le 17 août 1966; 2. sables et cailloux stratifiés horizontalement; 3. sables; 4. sables et cailloux de plus en plus petits en profondeur; 5. masse de sables et de petits cailloux découpée verticalement par de nombreuses veinules de glace irrégulières en épaisseur (maximum 1 cm); 6. fissure large de 1 cm occupée par du sable non cimenté par de la glace; 7. veinules de glace de 3 à 4 mm d'épaisseur.

B. Sur une pente de 22° : 1. microrelief dessinant en surface un réseau polygonal; 2. dépôt de pente sablo-graveleux sans structure visible; 3. limite supérieure du sol gelé le 23.8.66; 4. sable fin lité comprenant de moins en moins de cailloux en profondeur; 5. coin de glace et de sable actuellement fossilisé; 6. masse de cailloux et de sable apparue lors du façonnement du coin 5; 7. coin de sable et de glace actuellement en croissance; 8. sol fossile recouvert de nombreux débris végétaux datés par  $C_{14}$  de 9740 ans B.P. ( $\pm 150$  ans); 9. cailloutis grossier.



En surface, dans les régions périglaciaires actuelles, les fentes de gel à remplissage de sable et de glace apparaissent différemment suivant l'importance de l'apport extérieur dans le remplissage. Si le remplissage est constitué presque uniquement d'éléments détachés des bordures de la fente de gel avec très peu de glace, la structure apparaît comme une simple dépression longitudinale profonde de quelques centimètres à quelques décimètres et large de 30 à 80 cm (Pissart, 1968). Si par contre, le remplissage s'effectue à la suite d'un apport extérieur (eau ou sables éoliens, par exemple), de part et d'autre de la dépression existe de légers bombements (voir fig. 2).

Génétiquement ces structures ne diffèrent pas des fentes de gel à remplissage de glace que nous avons décrites auparavant. Elles se trouvent seulement sous un climat et en des endroits très secs (généralement dans des sols sableux). La sécheresse explique que la fissure ne se remplisse pas de glace et que des grains de sable descendus des parois ou apportés par le vent puissent y descendre. La quantité plus ou moins grande de glace existant au sein du coin s'étendant dans le permafrost dépend avant tout des conditions d'humidité locales de l'endroit où les fentes sont apparues.

La signification paléoclimatique de ces fentes de gel à remplissage de sable et de glace est très voisine de celle des fentes de gel à remplissage de glace. Elles impliquent un pergélisol, mais sans doute aussi un climat sec et très rigoureux (car les sables contiennent assez peu de glace et ont, de ce fait, un coefficient de rétraction thermique assez faible).

### **C) Les fentes de gel à remplissage minéral développées dans un milieu dégelant chaque année.**

#### *1. Uniquement dans la zone active surmontant le pergélisol.*

Des fentes de gel développées uniquement dans la zone active, sans se prolonger dans le pergélisol sous-jacent ont été décrites par B. N. DOSTALOV (1960, cité par J. Dylik, 1966), par nous-mêmes dans l'arctique canadien (fig. 5) (Pissart, 1968) et montrées en 1969 par E. M. KATASOV lors du symposium réunissant en Yakoutie Centrale la Commission périglaciaire de l'U.G.I. et la commission de paléogéographie de l'INQUA.

Apparues dans des sables et des graviers, en des endroits très secs, ces structures se présentent, au stade d'évolution ultime, comme des coins très larges et peu profonds. En coupe, leur forme se rapproche alors d'un triangle équilatéral. Le remplissage est constitué de sables et de graviers (évidemment sans glace à la fin de l'été). Ce remplissage montre, comme les fentes de gel à remplissage de sable et de glace, une apparence de litage dessinant des coins accolés et une diminution avec la profondeur de la taille des cailloux descendus depuis la surface.

Les roches encaissantes ne montrent pas en bordure de la fente un infléchissement vers le haut comme dans les fentes de gel à coin de glace; au contraire, quand une déformation est observée, elle se marque plutôt vers le bas.

Les plus minces fentes de gel de ce type décrites par E. M. KATASOV (1969) ne consistent d'ailleurs qu'en un infléchissement vers le bas des couches encaissantes en bordure de la fissure, sans réelle existence d'un remplissage. Le caractère anormal de cette inflexion vers le bas avait été souligné par J. DYLIK (1966, p. 260). Il est vraisemblable que, comme pour les fentes de gel à remplissage de glace, la fissure est occupée par de la glace au moment du dégel et que celle-ci empêche

le sol de revenir au printemps dans sa position initiale. Au cours de l'été, la fonte de la glace permet au sol sableux peu cohérent de s'affaisser dans la fissure.

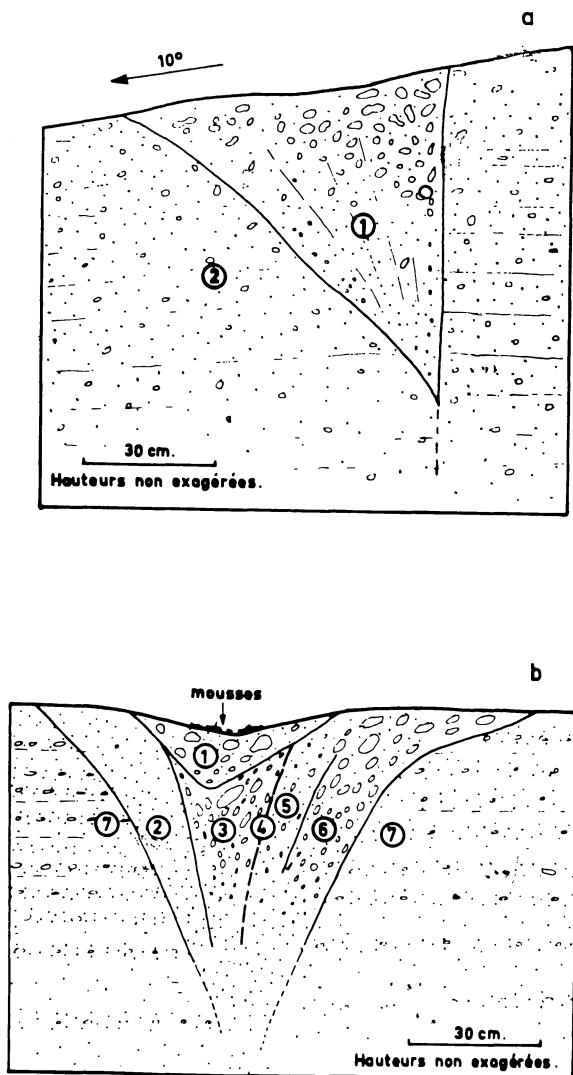


Fig. 5. — Coupe dans des fentes de gel à remplissage uniquement minéral (Ile Prince Patrick, 76° lat. N., Arctique Canadien).

a) Sur une pente de 10° : 1. coins de sables et de graviers présentant une allure peu distincte de coins accolés et une diminution granulométrique très nette avec la profondeur; 2. couches de sables et graviers de la formation de Beaufort, pratiquement non déformées;

b) Sur une surface horizontale : 1. coin de sables et de cailloux, un peu plus sombre car humifère; 2. sable sans structure distincte; 3. coin de cailloux de plus en plus petits en profondeur; 4. fissure béante de quelques mm. de largeur; 5. sables et cailloux de plus en plus petits en profondeur; 7. sables et cailloux stratifiés de la Formation de Beaufort (d'âge probablement tertiaire); la stratification est dans le détail mal visible, mais ne paraît pas déformée à proximité du coin.

En surface, ces structures correspondent à un réseau polygonal de légères dépressions de quelques décimètres de largeur et de profondeur. L'aspect est identique à celui des fentes de gel à remplissage de sable et de glace qui ne montrent pas non plus de bombements de part et d'autre de la fissure.

En hiver, la zone active qui englobe ces fentes de gel contient beaucoup moins de glace que le permafrost sous-jacent. C'est vraisemblablement la différence de cohésion et aussi la différence de coefficient de retrait lié à cette différence de teneur en glace qui est responsable de ce que la fracturation n'est pas la même dans le pergélisol et dans la zone active. La partie supérieure du sol pauvre en glace semble se découper en un réseau polygonal à mailles serrées qui ne prolonge pas toujours le réseau polygonal à mailles plus larges apparaissant dans le pergélisol.

Ces structures paraissent liées à un climat aux hivers très rigoureux. Elles dépendent cependant avant tout de conditions locales de sécheresse et de substrat à granulométrie grossière.

## 2. A la partie supérieure du sol, sans pergélisol en profondeur.

Des structures absolument identiques à celles que nous venons de décrire, et par l'aspect en surface, et par l'allure en coupe, ont été observées dans des régions où n'existent pas de permafrost (\*). Une excellente description de ces

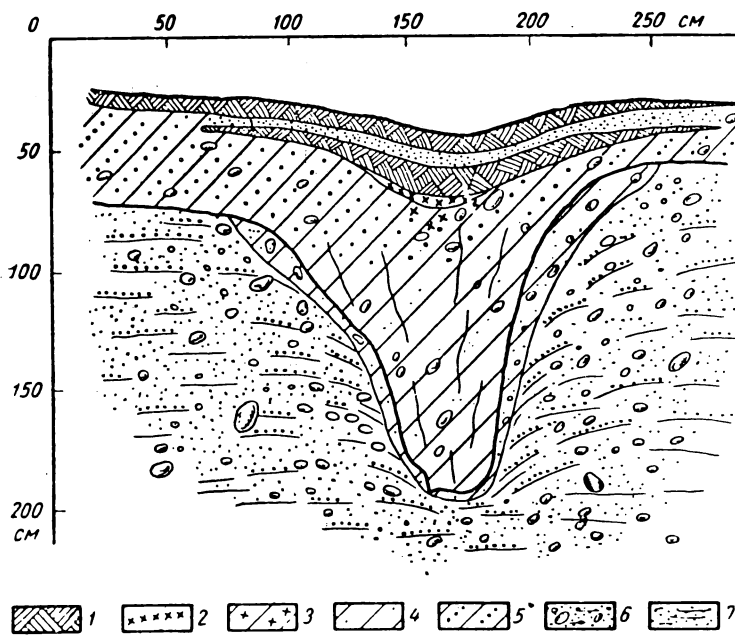


Fig. 6. — Coupe dans une fente de gel à remplissage uniquement minéral se constituant dans une région sans permafrost. 1. Couverture de tourbe et de mousse; 2. Horizon A; 3. Horizon B; 4. Horizon argileux; 5. Horizon sableux; 6. Graviers et cailloux; 7. Sable.

Extrait de N. S. DANILOVA, 1965, fig. 2, p. 98.

(\*) Des fissures de fente de gel s'ouvrant en hiver dans des régions où n'existent pas de pergélisol ont été, par ailleurs, décrites par A. L. WASHBURN, D. D. SMITH and R. H. GODARD en 1963, et par H. SVENSSON en 1967. Ces auteurs n'ont cependant pas observé que des structures particulières apparaissaient dans le sol à la suite de ce phénomène.

formes a été donnée par N. S. DANILOVA en 1956 (fig. 6). Elle pensait que les formes qu'elle décrivait, étaient apparues dans la zone active mais que de telles structures pouvaient se constituer indépendamment de tout permafrost. D'après J. DYLIK (1966), cette opinion a été confirmée par BOBOV (1960) qui a montré que les fentes de gel décrites par N. S. DANILOVA sont encore actives aujourd'hui alors qu'il n'existe pas de pergélisol. La même opinion avait d'ailleurs été émise en 1955 par A. V. PATALIEV pour des structures décrites près de Khabarovsk à l'extrémité orientale de l'Union Soviétique où le sol dégèle chaque année. En 1952, R. F. BLACK a par ailleurs souligné que des fentes de gel à remplissage minéral peuvent apparaître dans des régions sans permafrost sous l'effet des gels saisonniers.

La distinction entre des structures fossiles de ce type et les structures que nous venons de décrire au-dessus d'un pergélisol, n'est pas possible dans l'état actuel des connaissances, leur aspect étant identique en surface comme en coupe. Or, certaines se forment maintenant dans une région subissant des hivers extrêmement rigoureux, mais dont la température moyenne annuelle est supérieure à 0° C. Elles montrent que toutes les fentes de gel fossiles ne sont pas nécessairement des indices de l'existence d'un pergélisol au moment de leur formation.

#### D) Conclusion.

La classification présentée ci-dessus est schématique. Il ne faut cependant pas perdre de vue que toutes les transitions, tous les passages d'un type à l'autre existent dans la nature. Entre les fentes de gel à remplissage de glace, et les fentes de gel à remplissage de sable et de glace (avec seulement de la glace ciment), il est possible de trouver toutes les transitions. De même, les fentes de gel à remplissage minéral qui peuvent se trouver uniquement dans la zone active, se prolongent souvent par des fissures dans le pergélisol sous-jacent. L'excursion dirigée en 1969 par E. M. KATASONOV en Yakoutie a montré l'existence de ces types intermédiaires.

Au point de vue climatique, les fentes de gel à remplissage de glace et à remplissage de sable et de glace apparaissent au sein d'un pergélisol, c'est-à-dire dans une région où la température moyenne annuelle est inférieure à 0° C. Par contre, les fentes de gel à remplissage uniquement minéral peuvent se constituer sous l'action de gels saisonniers dans une région sans permafrost. La distinction de ces différents types parmi les structures fossiles n'est pas toujours aisée. Dans l'état actuel des connaissances, les critères distinctifs permettant de reconnaître les fentes de gel à remplissage uniquement minéral, sont les suivants :

1. Elles sont développées dans des sables.
2. Leur remplissage présente un litage vertical plus ou moins clair et, si la granulométrie s'y prête, un triage (les plus gros éléments étant à la partie supérieure).
3. Les formations encaissantes sont, au contact de la fente de gel, incurvées vers le bas (alors que dans les fentes de gel à remplissage de glace, elles sont rebroussées vers la surface).
4. Ces structures sont peu profondes puisque limitées à la zone gelée en hiver ou à la zone active surmontant le pergélisol.
5. Au stade ultime de leur évolution, elles peuvent se présenter comme des coins très larges, presque en triangle équilatéral.

Les trois premiers critères mentionnés existent également pour les fentes de

gel à remplissage de sable et de glace développées dans le pergélisol. Par conséquent, seul le grand développement vertical permettrait sans doute de les distinguer des fentes de gel à remplissage uniquement minéral.

Au total, donc, seuls les moulages de fentes de gel à remplissage de glace et les structures de fentes de gel à remplissage minéral mais développés verticalement sur plus de 2 mètres indiqueraient l'existence certaine d'un pergélisol (\*).

## II. L'APPARITION DE GLACE DE SÉGRÉGATION ET SES MULTIPLES CONSÉQUENCES

### A) Principes physiques.

Au sein d'une roche meuble à grains fins comprenant une certaine quantité d'eau, un gel lent détermine l'apparition de lentilles de glace de ségrégation (fig. 7).



Fig. 7. — Lentilles de glace de ségrégation apparues dans des limons (Yakoutie, août 1969).

L'apparition de cette glace de ségrégation engendre de nombreux phénomènes importants au point de vue géomorphologique tels que le soulèvement du sol, une distribution différente de l'eau, des phénomènes de triage, etc. Nous allons décrire

(\*) Nous n'avons pas considéré ici les fentes à remplissage minéral qui naissent sous l'action d'autres processus comme par exemple des alternances d'humidification et de séchage. Comme l'ont montré encore récemment J. T. NEAL et W. S. MOTTS (1968) ce processus peut également donner naissance à des structures en coin, atteignant 5 mètres de profondeur. Toutefois, cette action se réalise dans des formations de granulométrie fine contenant beaucoup d'argile.

ces phénomènes après avoir étudié le mécanisme physique responsable de l'apparition de ces lentilles de glace. Rappelons que, comme cette glace provoque une dégradation spectaculaire des routes au moment du dégel, plusieurs de ses aspects ont été bien étudiés par les ingénieurs.

Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer comment l'eau migrait dans le sol pour constituer des masses de glace de ségrégation. La théorie proposée dès 1930 par S. Taber nous paraît très satisfaisante. Elle explique le phénomène par la migration d'eau capillaire entourant les particules fines du sol. La figure 8 illustre ce mécanisme. Dans un sol humide et refroidi depuis la partie sommitale s'établit un gradient de température. A la limite de l'isotherme de  $0^{\circ}\text{C}$ , l'eau libre se transforme en glace. L'eau adsorbée, par contre, tenue sous pression par la force capillaire gèle à une température inférieure (voir chapitre III). Lorsque cette température est atteinte à la suite du refroidissement, l'eau adsorbée qui est transformée en glace, est remplacée par de l'eau venue de la partie inférieure car la force capillaire tend à maintenir en permanence tout autour des grains un film d'eau adsorbée d'épaisseur constante. De la sorte, l'eau migre vers la zone de gel et si l'alimentation en eau compense le refroidissement, l'onde de gel s'arrête à l'emplacement d'une lentille de glace qui progressivement, s'épaissit. L'eau peut, par l'intermédiaire de ce film capillaire provenir de réserves d'eau éloignées. Le mécanisme est, somme toute, comme le disait G. Beskow (1935), identique à celui qui se produit sous l'effet de l'évaporation. Toutefois ici, l'eau est soustraite au film capillaire parce qu'elle passe à l'état solide, tandis que dans le cas de la vapeur, elle passe à l'état gazeux.

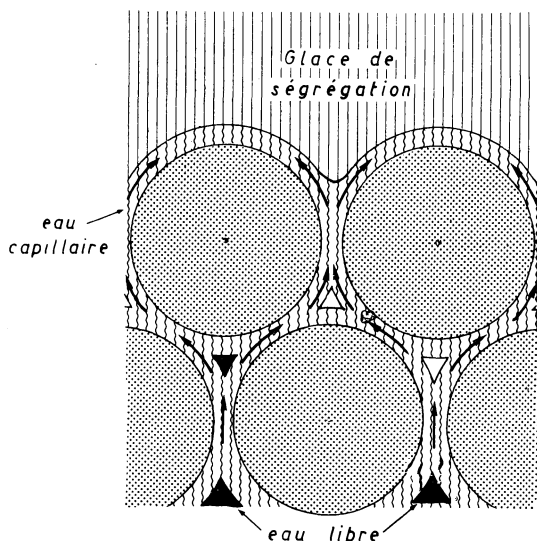


Fig. 8. — Schéma montrant la migration de l'eau capillaire vers une lentille de glace de ségrégation en cours de croissance.

D'autres hypothèses pour expliquer la migration de l'humidité ont été avancées. L'une fait appel à l'augmentation de la tension superficielle qui accompagne l'abaissement de la température, une autre à des pressions osmotiques dues à des différences de concentration en sels au sein du sol en train de geler, ... Tous ces facteurs

jouent effectivement un rôle et rendent le problème de la migration de l'eau extrêmement complexe. Nous n'entrerons pas dans l'analyse de cette question qui n'est pas encore complètement résolue car l'explication que nous avons donnée ci-dessus est suffisante pour la suite de notre exposé. Elle permet en effet de comprendre les influences de la vitesse du gel, de la direction du gradient thermique, de la nature des matériaux et enfin, du degré d'humidité existant au départ.

*Influence de la vitesse de progression du gel.*

Un gel trop brutal empêche l'apparition de lentilles de glace de ségrégation. En effet, dans ces conditions, la migration de l'eau n'a pas le temps de se produire et l'eau est figée à l'endroit où elle se trouve. Une condition indispensable à l'apparition de lentilles de glace de ségrégation est donc une certaine lenteur de congélation. Une lentille de glace grandira aussi longtemps que le refroidissement en cet endroit est tout entier utilisé à congeler l'eau qui y arrive. Un gel plus rapide ou une arrivée d'eau réduite permet la progression du gel au-delà de la lentille qui se constitue et entraîne de ce fait, l'arrêt de sa croissance.

Chaque lentille de glace de ségrégation résulte donc d'un équilibre temporaire entre le refroidissement et l'arrivée d'eau capillaire, ce dernier facteur dépendant aussi bien de la granulométrie et de la perméabilité du matériel que de l'humidité disponible.

*Influence de la direction de progression du gel.*

Normalement, les lentilles de glace de ségrégation jalonnent les positions successives occupées par le front de gel. Elles sont donc approximativement parallèles à la surface du sol. La pression qu'elles exercent du fait de leur croissance est dirigée perpendiculairement à leur allongement, soit aussi, dirigée perpendiculairement à la surface du sol.

*Influence de la granulométrie du matériel.*

La première condition pour que des lentilles de glace de ségrégation puissent apparaître est l'existence d'un matériel dont la granulométrie est assez fine pour donner un film d'eau capillaire continu qui permette le déplacement de l'humidité et son arrivée dans la zone de gel. Il convient, par ailleurs, que la perméabilité du matériel soit suffisante pour que le déplacement de l'eau capillaire ne soit pas trop lent.

Sans entrer dans des détails, car la littérature concernant ce sujet est extrêmement abondante, on peut affirmer que la glace de ségrégation apparaît surtout dans les limons. Dans les argiles, la perméabilité du matériel étant trop faible, il ne se forme pas ou très peu de glace de ségrégation. Il existe bien entendu des différences suivant les types d'argile; Linnel et Kaplar (1959), ont montré que les lentilles de glace apparaissent plus facilement dans la kaolinite que dans l'illite ou la chlorite ou surtout que dans la montmorillonite. Dans les sables grossiers, non seulement aucune succion de l'eau n'apparaît (alors qu'elle peut atteindre des valeurs très importantes dans certains limons, d'après Croney et Coleman, 1961), mais il se produit au contraire des pressions positives et l'eau est exsudée par le côté non gelé pour compenser l'augmentation de volume dû au gel.

**B) Les conséquences directes et indirectes de l'apparition de glace de ségrégation.**

**1. SOULÈVEMENT DU SOL PAR LE GEL.**

La conséquence la plus immédiate de l'apparition de glace de ségrégation est

le soulèvement du sol par le gel. Ce soulèvement observé par chacun d'entre nous pendant l'hiver, s'effectue perpendiculairement à la surface du sol. La descente au dégel se produisant verticalement, il en résulte un mouvement de transport en masse que la répétition des alternances de gel et de dégel peut rendre important. Le dessin classique du soulèvement des cailloux perpendiculairement à la surface du sol et de leur retombée selon la verticale représente le même phénomène car les pipkrakes ne sont rien d'autres que des cristaux de glace de ségrégation superficielle.

Les palsars sont les formes les plus spectaculaires dues à l'accumulation dans le sol de glace de ségrégation. Il s'agit de buttes atteignant 5 à 6 m de hauteur (H. Svensson, 1965) et qui peuvent avoir plusieurs dizaines de mètres de diamètre. Ces buttes sont recouvertes de tourbe qui joue dans leur apparition un rôle fondamental. En été, au moment où elle est sèche, cette tourbe constitue un excellent isolant thermique. En hiver, par contre, gelée avec une certaine quantité d'eau, elle conduit mieux le froid. De la sorte, en ces endroits tourbeux, le bilan thermique du sol est déficitaire et une masse gelée peut persister toute l'année dans le sol, dans des régions où ailleurs n'existe pas de permafrost.

## 2. AUGMENTATION DE L'HUMIDITÉ A LA PARTIE SUPÉRIEURE DU SOL AU DÉGEL.

Le résultat le plus désastreux et aussi le plus connu de l'apparition de glace de ségrégation est l'existence dans la partie supérieure du sol au moment du dégel, d'une quantité plus importante d'eau que celle qui existait au départ. Cette eau qui s'est accumulée petit à petit sous forme de glace de ségrégation ne peut pas retourner en profondeur, tant qu'en dessous subsiste une couche gelée. L'eau stagne ainsi dans le sol parfois en quantité formidable en lui enlevant toute cohésion. Il s'affaisse alors, même sous de faibles poids. C'est pour éviter, par ce phénomène, la destruction des routes lors de la fusion de la glace de ségrégation que des barrières de dégel sont élevées.

Indépendamment de toute sollicitation extérieure, les sols gorgés d'eau au moment du dégel sont réputés se mettre en mouvement même sur de faibles pentes par des phénomènes de solifluxion. Ce processus est assez fréquent et important pour avoir mérité un nom spécial, à savoir celui de congélifluxion. Son importance semble avoir été quelque peu surestimée au cours des 15 dernières années.

## 3. MODIFICATION DE STRUCTURE DU SOL.

Des expériences de laboratoire que nous avons réalisées montrent que dans le cas d'un matériel limoneux ou argileux sursaturé d'eau au départ, et refroidi très lentement, la formation de glace de ségrégation détermine l'apparition d'une structure polyédrique extrêmement persistante. Entre les veines de glace de ségrégation se constituent en effet, à la suite du retrait dû à la dessiccation, des veinules de glace verticales qui avec les lentilles horizontales limitent des polyèdres de matières minérales (fig. 9). La disposition est identique à celle que H. Svensson (1965, p. 140 et 141, fig. 3 et 4) a observée dans un pals de Suède. Au sein des polyèdres limités par ces veines de glace, la succion de l'eau détermine un tassement considérable de la matière (\*) au point que l'humidité n'est réabsorbée que très

(\*) Il a été observé dès 1897, par P. J. Holmquist que des parties de sol plastique et non gelée peuvent exister entre des couches de glace. Comme G. L. Bouyoucos (1916) et S. Taber (1930) l'ont expliqué, cela est dû à ce que toute l'eau du sol ne gèle pas à 0° C. Seule l'eau libre se congèle à cette température, l'eau capillaire gèle à une température inférieure. Par conséquent sous 0° C, la migration de l'eau peut se poursuivre.



lentement. Immergés dans l'eau, ces polyèdres ne redeviennent une masse pâteuse qu'après plusieurs mois (\*).

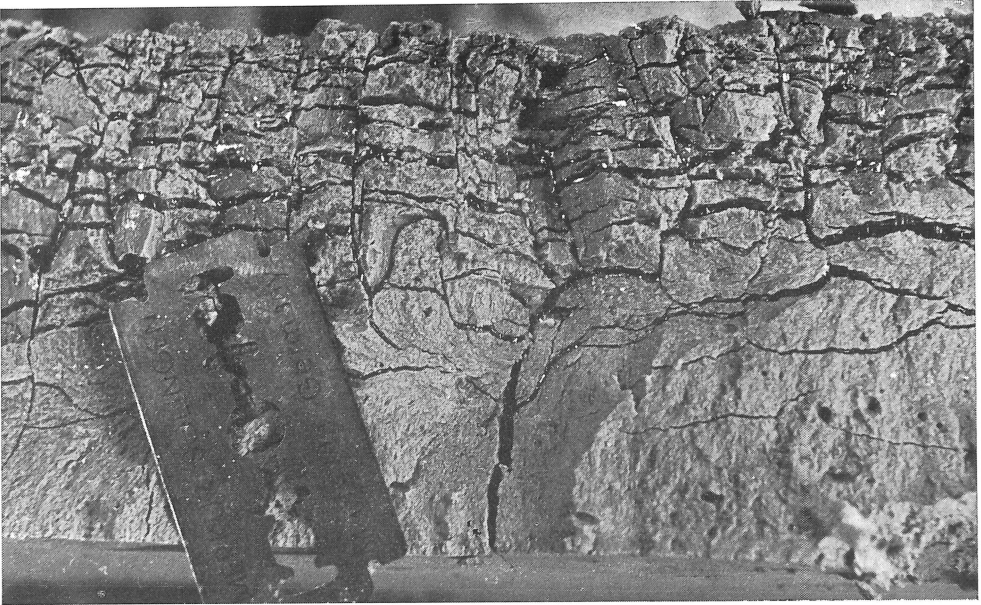


Fig. 9. — Lentilles de glace de ségrégation apparues au sein d'une masse de limon éolien gorgée d'eau et soumise à un gel lent depuis la partie supérieure. Les lentilles de glace découpent le sol en des polyèdres qui subsistent longtemps après la fusion de la glace. A la partie inférieure, une fissure de dessiccation est apparente.

Lorsque semblable structure est apparue, les conditions lors d'un second gel sont entièrement différentes de celles qui existaient au départ. Cette modification de structure constitue donc une difficulté considérable dans la réalisation d'expériences voulant mettre en évidence l'action de plusieurs cycles de gel et de dégel. Par ailleurs, dans la nature, de semblables structures sont susceptibles de contrarier l'apparition de phénomènes de congélifluxion. Il faut toutefois remarquer que le plus souvent le gel se produit dans des sols non entièrement saturés d'eau et que, du fait de l'existence d'air au sein du sol, la stabilité des polyèdres qui peuvent apparaître est beaucoup moins grande.

#### 4. DESSICATION DU SOL EN PROFONDEUR.

S. Taber (1929) a montré que la migration de l'eau vers la surface détermine

(\*) L'évolution est tout à fait différente si l'assèchement du sol se produit de telle sorte qu'elle permette la pénétration d'air en son sein. L'air pénètre lorsque la limite de retrait est atteinte; il provoque alors une modification de la teinte du sol, qui devient beaucoup plus claire. La réhydratation, après une telle dessiccation au-delà de la limite de retrait se produit quasi instantanément. L'eau pénètre rapidement dans le sol en chassant devant lui et en mettant sous pression l'air qui y est inclus. Celui-ci provoque alors immédiatement la rupture du sol en de petits agrégats qui se transforment en une masse boueuse. Ce mécanisme est certainement responsable de l'érosion intense que produisent les premières pluies tombant sur un sol complètement desséché. Il joue peut-être également un rôle important dans les phénomènes de congélifluxion.

l'assèchement de la partie profonde et l'apparition de fissures de retrait. Nous avons souligné (Pissart, 1964) que ce phénomène pouvait donner naissance en profondeur à un réseau polygonal de fissures de dessiccation (fig. 9) dont le rôle est sans doute important dans la formation de certains sols polygonaux périglaciaires de petite taille.

##### 5. TRIAGE GRANULOMÉTRIQUE.

L'apparition de lentilles de ségrégation de glace, produit des phénomènes de triage. Dans un sol où des lentilles se constituent, les cailloux migrent vers la zone de refroidissement. Par ailleurs, les éléments les plus fins se déplacent indépendamment en sens opposé. Les mécanismes en cause sont différents aussi, nous les examinerons successivement.

###### a) *Le mouvement des particules fines.*

A. E. Corte (1966) a montré par des expériences que les éléments fins du sol étaient repoussés au sein de celui-ci dans le sens de la progression du gel par la glace du sol. La démonstration expérimentale en a été apportée par un gel latéral dans

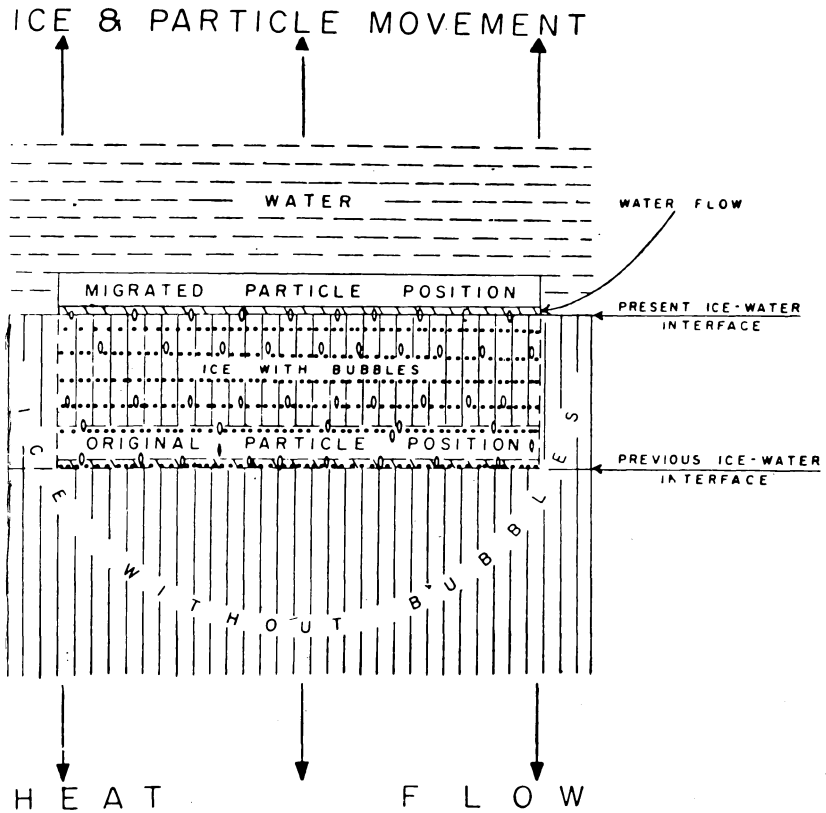


Fig. 10. — Schéma d'une expérience de A. E. CORTE montrant que des particules sont soulevées par la croissance d'une masse de glace. Dans cette expérience, l'eau est congelée de bas en haut et les particules sont déposées sur la glace en croissance.

Extrait de A. E. CORTE, 1966, p. 209.

des récipients de matériel très humide, gel suivi par l'étude de la granulométrie aux différents endroits du récipient. Une seconde expérience consistant à disposer des particules minérales sur une masse de glace se constituant au fond d'un récipient rempli d'eau et refroidi par la base a permis de comprendre comment semblable déplacement s'effectuait (fig. 10) : en effet, ces éléments sont soulevés par la glace en croissance; les éléments les plus grossiers sont faiblement déplacés tandis que les parties les plus fines le sont bien plus. Ce phénomène résulte de l'existence d'un film d'eau entre la particule minérale et la glace, film d'eau qui permet la croissance de la glace sous la particule elle-même et consiste donc en un mécanisme semblable à celui qui donne naissance à la glace de ségrégation. Ainsi, une répulsion des particules minérales s'effectue au sein du sol par la glace en croissance, et comme dans l'expérience de Corte, cette répulsion est d'autant plus importante qu'elle affecte des particules de petite taille.

b) *Le mouvement des cailloux.*

La migration des cailloux dans le sol sous l'action du gel est connue depuis longtemps. G. Beskow (1935) signale que le fait avait déjà été observé en 1664; toutefois, les premières explications de ce phénomène furent seulement données au milieu du 18<sup>e</sup> siècle. Le phénomène est rapide puisque S. Taber en 1943 (p. 1453) mentionne dans la région de Fairbanks que le soulèvement d'un bloc atteignait 25 cm par an. Ce processus intéresse aussi bien les ingénieurs que les géologues car il affecte autant les piles qui soutiennent des bâtiments ou des ponts que des cailloux. T. L. Péwé (1966, p. 32) en montrant une photo saisissante (fig. 11) de



Fig. 11. — Triage granulométrique dans un champ de polygones périglaciaires. La longueur apparente du mètre ruban est de 25 cm. (Chambeyron, Alpes Françaises, 2800 m).

l'effet de ce soulèvement sur les piles d'un pont, affirme que le mouvement peut atteindre en Alaska 35 cm par an. Malgré l'importance du phénomène, des avis divergents ont été formulés pour en expliquer le mécanisme. Pour certains, le soulèvement proviendrait de l'apparition de glace sous le caillou qui est meilleur conducteur de la chaleur. Toutefois, cette explication n'est valable ni pour les objets en bois (mauvais conducteur) qui pourtant subissent le même mouvement, ni pour les piles qui sont enfoncées dans le pergélisol et dont l'extrémité reste toujours dans le sol gelé, ni non plus, pour des éléments soulevés par le gel alors que celui-ci n'a pas atteint sa partie inférieure (voir par exemple ci-dessous les expériences expliquant les cailloux dressés). Par conséquent, la seconde explication que nous reproduisons ci-dessous et qui, d'après Liboutry (1965, p. 977), aurait déjà été invoquée par Hamberg dès 1915 nous paraît préférable. Elle est liée directement au soulèvement du sol par le gel, et donc à l'apparition de glace de ségrégation.

Lorsque le sol humide gèle au contact d'un caillou, il adhère immédiatement à lui. Le caillou est alors solidaire du sol gelé et en suit tous les mouvements. Dès ce moment, l'apparition de lentilles de glace de ségrégation qui entraînent le soulèvement du sol, produira en même temps le déplacement des cailloux qui y

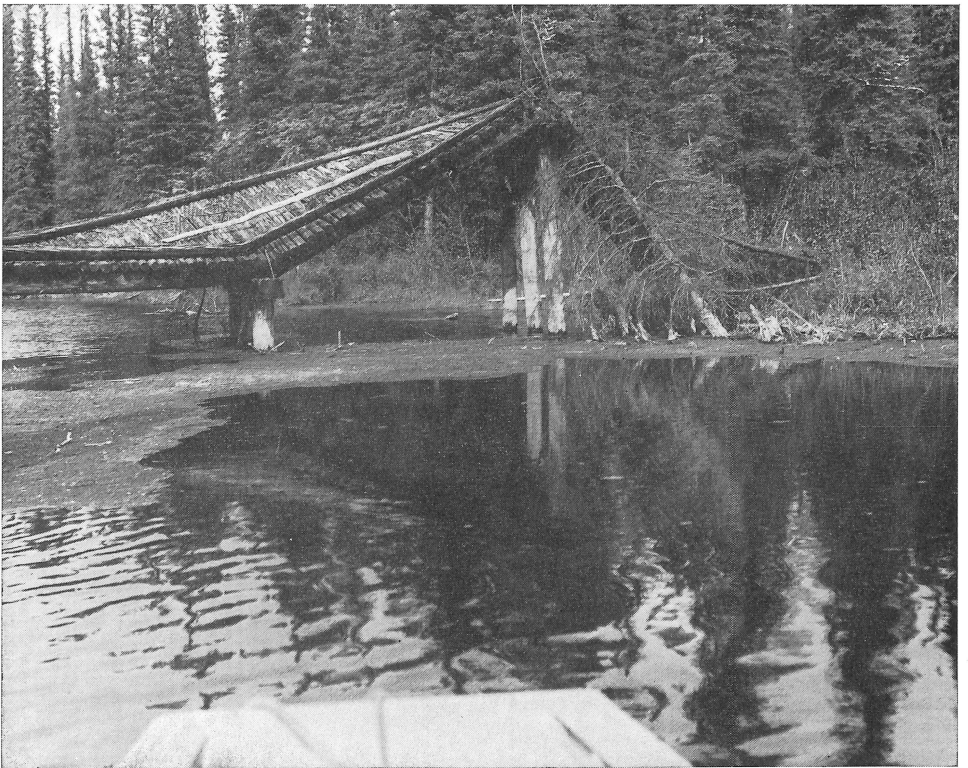


Fig. 12. — Soulèvement par le gel des piles d'un pont enjambant l'exutoire du Lac « Clearwater », 8 miles au S. E. du « Big Delta », Alaska.

L'original de cette photo nous a été aimablement communiqué par T. L. PEWE que nous remercions vivement. Elle a été publiée dans PEWE and PAIGE, 1963, p. 346.

adhèrent. Si des lentilles de ségrégation apparaissent au cours de la progression du gel, sur la hauteur du caillou, celui-ci solidaire de la partie du sol déjà gelée, subira un déplacement par rapport au matériel situé en-dessous des lentilles de glace de ségrégation (\*). Un vide peut, de la sorte, apparaître sous le caillou. Toutefois, ce vide peut être comblé soit par du matériel boueux qui a suivi le caillou dans son soulèvement, soit par du matériel descendu dans l'ouverture béante au moment du dégel. Le caillou ne peut donc pas toujours redescendre dans sa position originelle.

Ce mécanisme explique que les cailloux se déplacent dans le sol perpendiculairement aux lentilles de glace de ségrégation, soit perpendiculairement à l'onde de gel. Leur déplacement est d'autant plus important que la masse de glace de ségrégation apparue sur la hauteur du caillou est considérable, soit d'autant plus important que les cailloux sont volumineux. Ainsi un triage granulométrique se produit. Celui-ci ne consiste pas seulement en l'expulsion des cailloux hors du matériel fin mais également en un vrai classement des éléments selon leur taille puisque leur vitesse de déplacement dépend de celle-ci (fig. 12).

#### 6. LE REDRESSEMENT DES CAILLOUX DANS LE SOL.

Un mouvement rotationnel des cailloux peut se produire en même temps que leur soulèvement par le gel. Les éléments tendent de la sorte à occuper dans le sol une position de plus en plus verticale.

Nous avons démontré expérimentalement ce fait en plongeant dans des bacs de limon et de sable fin gorgé d'eau des aiguilles métalliques rigides (morceaux d'aiguilles à tricoter). Celles-ci étaient au départ inclinées de  $45^\circ$  et leurs extrémités

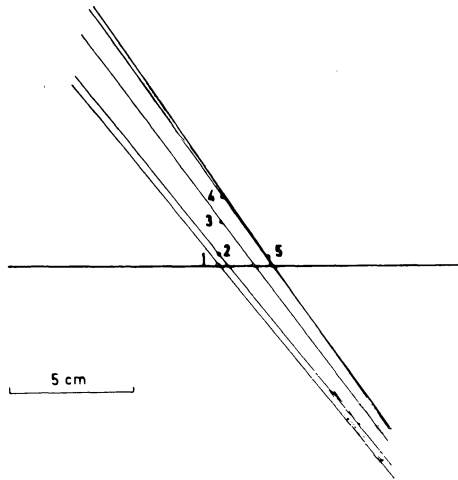


Fig. 13. — Positions successives d'une aiguille d'acier plongée dans un bac de sable fin gorgé d'eau et subissant un gel depuis la partie sommitale. Le point en face du chiffre indique la position de la surface du sol.

1. Après 24 heures de gel;
2. Après 48 heures;
3. Après 72 heures;
4. Après 96 heures;
5. Après dégel complet.

(\*) Les ingénieurs empêchent le soulèvement des piles en les enfonçant profondément dans le pergélisol (de telle sorte que l'adhérence avec le permafrost soit supérieure à celle qui se réalise dans la zone active) et en plaçant des gaines mobiles autour de la pile dans la partie où elle est située dans la zone active.

dépassaient la surface de la boue d'une dizaine de centimètres (fig. 13). De la sorte, il a été possible de suivre pendant les expériences les mouvements que ces aiguilles subissaient. Une alimentation en eau au fond de la masse de boue avait été aménagée pour permettre une arrivée libre de l'eau pendant le gel.

Sous l'effet d'un gel très lent (et limité à la partie supérieure de la masse de boue) d'importantes lentilles de glace de ségrégation sont apparues. De la sorte, la surface du sol s'est soulevée progressivement tout en entraînant l'aiguille qui était solidaire de la partie gelée. Ce soulèvement de l'aiguille s'est accompagné d'un mouvement rotationnel comme le montre la figure 13. Au moment du dégel, le sol s'est affaissé mais l'inclinaison de l'aiguille a été conservée. Lors du gel suivant, le soulèvement et le redressement de l'aiguille se sont accentués.

Le redressement de l'aiguille sous l'effet du gel est dû à ce que la force de soulèvement qu'elle subit et qui s'applique là où elle est prise dans le sol gelé est verticale (A. sur la fig. 14), alors que l'aiguille est inclinée de  $45^\circ$ . Le déplacement de l'aiguille vers la surface, tout en restant parallèle à sa position initiale rencontre une résistance indiquée sur la figure 14 par les vecteurs B. Cette résistance est fonction de la plasticité du matériel et aussi des dimensions, de la forme et de la position de l'aiguille. Les forces A et B constituent donc au moment du gel un couple de forces qui tend à provoquer une rotation de l'aiguille. Même dans une masse très visqueuse, au début du gel, l'effort rotationnel produit sur la partie gelée est considérable car, la longueur de l'aiguille fait office de bras de levier (les moments des forces B sont d'autant plus importants que les points d'application sont plus éloignés du point d'appui que constitue la partie gelée). Le mouvement rotationnel de l'aiguille se produit par déformation plastique du sol gelé qui l'entoure. Il est, en effet, bien connu qu'à des températures voisines du point de fusion, des tensions faibles mais constantes sont susceptibles de donner des déformations plastiques dans la glace et aussi, comme c'est le cas ici, dans un sol dont toutes les particules sont entourées de glace.

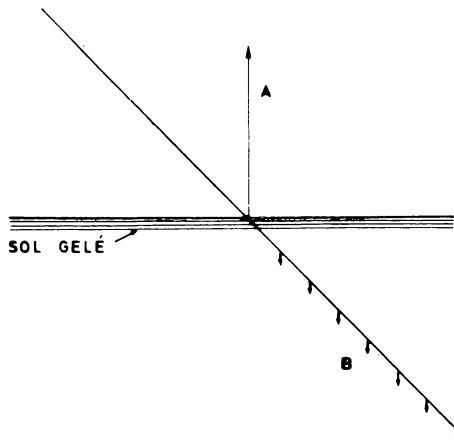


Fig. 14. — Représentation schématique des forces qui ont produit le redressement de l'aiguille montré par la figure 13.

Au moment du dégel, qui commence à la surface et se propage vers la profondeur, aucun effort inverse ne se produit. La nouvelle position de l'aiguille

reste acquise, pour autant qu'un vide béant ne subsiste pas à l'emplacement qui était occupé au départ par l'aiguille. Or, ce vide est le plus souvent colmaté, soit au moment du gel par la migration de matières ayant suivi le déplacement de l'aiguille, soit au moment du dégel, par la descente de matières dans les vides préalablement créés. Dans les expériences réalisées dans des sables fins, c'est ce dernier processus qui se produit alors que la partie inférieure de l'aiguille est toujours prise par le gel.

Les expériences réalisées ci-dessus peuvent être directement transposées à des cailloux allongés compris dans un sol subissant des alternances de gel et de dégel. Ils acquièrent par basculement au cours des gels une disposition verticale et cela d'autant plus rapidement que les phénomènes de soulèvement par le gel sont importants et fréquents.

### C) Conclusion.

L'apparition de glace de ségrégation est un phénomène extrêmement banal. Il se produit dans tous les sols fins humides qui subissent une congélation dans les conditions naturelles. Étant donné sa fréquence et aussi les multiples conséquences qui en découlent et que nous venons de décrire, il s'agit certainement du mécanisme physique périglaciaire le plus important. Il est fondamental de retenir que tous les phénomènes que nous venons de décrire ne nécessitent ni la présence d'un permafrost, ni l'existence de conditions de température exceptionnelles.

## III. L'AUGMENTATION DE VOLUME DE L'EAU SE TRANSFORMANT EN GLACE

### A) Principes physiques.

L'eau qui gèle augmente son volume de 9,08 %. Lorsque, par manque d'espace, cette augmentation de volume est impossible, l'abaissement de la température entraîne l'apparition de pressions considérables qui sont à l'origine de divers phénomènes dont la gélivation est sans doute le plus banal et aussi le plus connu. Le principe physique est facilement expliqué en présentant le diagramme des phases de H<sub>2</sub>O (fig. 15).

Ce diagramme montre que l'eau peut se trouver en équilibre avec 5 variétés stables de glace. Seule la glace I a une densité inférieure à la densité de l'eau, les autres ont une densité supérieure. Aussi, seule pour la glace I, la température d'équilibre diminue-t-elle avec l'augmentation de pression. Pour les autres types de glace, elle augmente et la glace VII peut être en équilibre jusqu'à une température de + 200° C. D'après Schoumsky (1965), dans la nature, seule la glace I semble exister. En effet, ajoute-t-il pour que la glace I se transforme en glace III, il faut une pression de 2.500 atmosphères. Il est certain qu'une semblable pression n'a jamais été atteinte même sous les plus grands inlandsis quaternaires car elle correspond à une épaisseur de glace de 27,7 km.

Sur ce diagramme, il n'y a donc que les conditions d'équilibre entre la glace I et l'eau qui nous intéressent. Or cette figure 15 montre qu'en dessous de — 22° C, toute l'eau est congelée sauf si elle se trouve sous une pression supérieure à 2047 atmosphères (\*). En d'autres termes, nous pouvons dire que les pressions

(\*) Ou encore, mais cela est improbable si l'eau se trouve dans un état nécessairement instable, de surfusion.

dégagées par la congélation de l'eau peuvent être énormes puisqu'elles sont susceptibles de dépasser 2000 atmosphères.

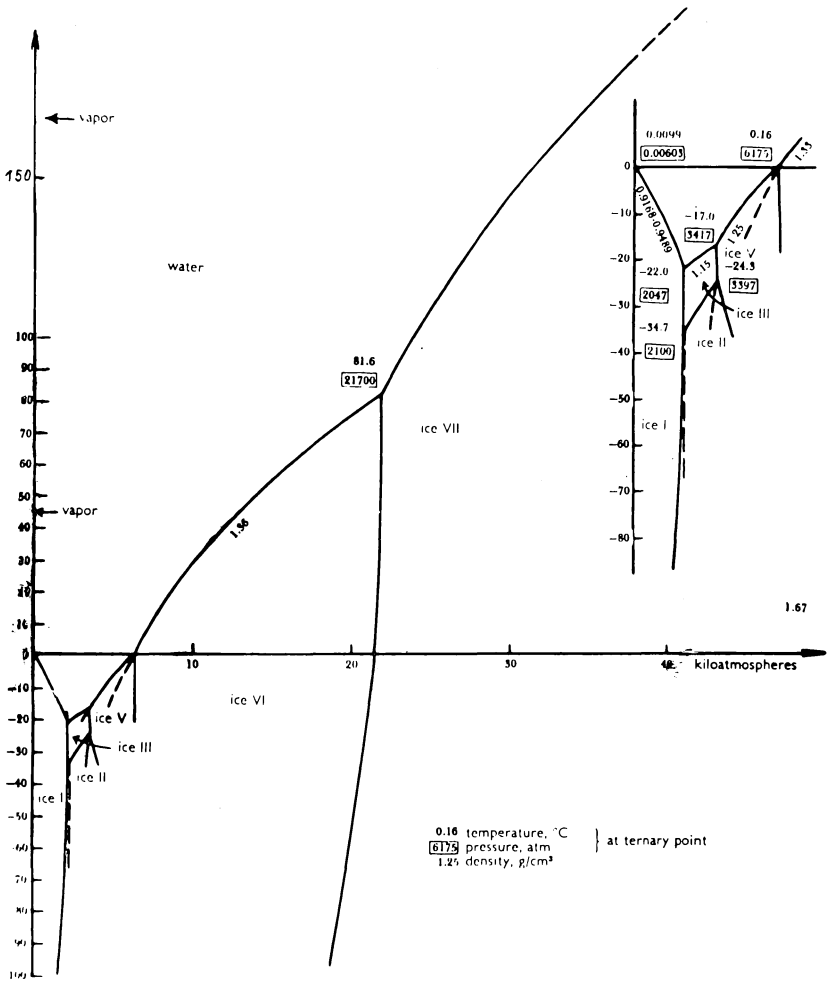


Fig. 15. — Diagramme des phases de H<sub>2</sub>O.  
Extrait de Schoumsky, 1955, fig. 2.

Les processus géomorphologiques qui résultent des pressions nées par congélation sont divers. Trois sont particulièrement connus : ils sont responsables des buttes de glace d'injection (les pingos), de certaines involutions et de la gélivation.

**B) Les buttes de glace d'injection : les pingos.**

La majorité des pingos résultent directement du phénomène d'augmentation de volume de l'eau au moment de la congélation. C'est le cas des pingos nés en système fermé que l'on trouve en grand nombre dans le delta de Mackenzie. Dans cette région où le pergélisol s'étend jusqu'à une grande profondeur, des poches de sédiments



non gelés existent sous certains lacs, à savoir ceux qui sont assez profonds. Ces poches non gelées s'expliquent, d'une part parce qu'en hiver à l'emplacement des lacs, le nombre de frigories absorbées par la transformation de l'eau en glace est telle que le gel n'atteint pas le fond; d'autre part, parce qu'en été, les rayons solaires pénètrent dans l'eau des lacs où ils provoquent un réchauffement considérable, beaucoup plus important que dans les régions voisines où une partie de la chaleur est rayonnée dans l'atmosphère. Ainsi, la quantité de chaleur qui parvient au fond des lacs est beaucoup plus importante que la quantité de froid qui y arrive même si la surface du sol voisin exposée à l'air libre présente un bilan thermique différent.

Si cependant, à la suite d'une baisse de niveau du lac ou d'un apport de sédiments, l'épaisseur d'eau diminue, le fond du lac commence à geler en fermant à la partie supérieure la poche non gelée sous-jacente. Au sein de cette enceinte fermée, l'augmentation de volume de l'eau qui se transforme en glace engendre une pression qui va s'élever peu à peu jusqu'au moment où de l'eau est injectée vers la surface (fig. 16 a). En se congelant dans le sol à faible profondeur, cette eau se transforme en glace d'injection dont l'accumulation peut engendrer l'apparition d'une colline de plusieurs dizaines de mètres de hauteur (fig. 17), colline que les esquimaux appellent pingos dans le delta de Mackenzie.

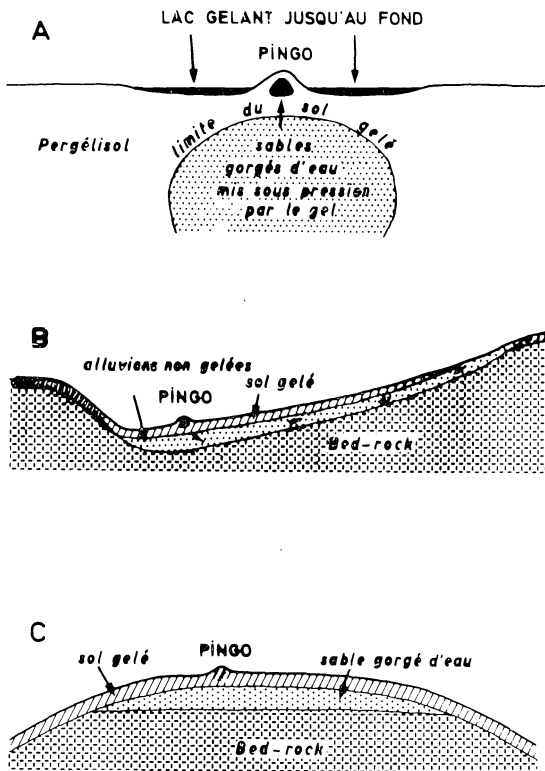


Fig. 16. — Trois origines différentes de pingos : A. en système fermé (type Mackenzie); B. En système ouvert (type Alaska); C. En système fermé l'hiver (type des formes fossiles de Belgique).



Fig. 17. — Pingo né en système fermé dans un creux thermokarstique (alás précédemment inondé).  
Alas Olong-Erien près Abalakh, Yakoutie, URSS.

Ce mécanisme exige bien entendu la présence d'un pergélisol profond et donc d'un climat rigoureux. La température moyenne annuelle des régions nord américaines où ce type de pingo existe est, selon G. W. HOLMES, D. M. HOPKINS et H. L. FOSTER (1963), comprise entre  $-11^{\circ}$  et  $-5,5^{\circ}$  C.

Toutefois, toute trace de pingo n'implique pas un climat aussi rude. En effet, on connaît en Alaska, par exemple, des pingos là où la température moyenne annuelle est comprise entre  $-5,5^{\circ}$  et  $-2^{\circ}$  C. Ils ont été expliqués par G. W. HOLMES, D. M. HOPKINS et H. L. FOSTER (1963) comme nés en système ouvert, c'est-à-dire que la pression déterminant l'injection ne serait pas due à l'augmentation de volume d'eau se transformant en glace, mais bien à une pression hydrostatique d'eau s'écoulant sous le permafrost et mise en charge sur les pentes situées en contrehaut (fig. 16 b).

Il est vraisemblable que, entre les deux types définis ci-dessus, existent des formes intermédiaires (\*). Les traces fossiles de pingos que nous avons décrites en Belgique nous autorisent à le penser (A. PISSART, 1956 et 1965). En effet, en l'absence d'un pergélisol profond, la congélation même partielle d'une masse d'eau

(\*) Pour ne pas allonger notre exposé, nous ne parlons pas ici des pingos plus exceptionnels qui apparaissent sous un climat très froid à la suite de variations du niveau marin. Nous en avons montré un exemple en 1967, sur l'île Prince Patrick :

comprise dans des sédiments grossiers intercalés entre un substratum imperméable et un pergélisol superficiel a, en effet, pu fournir la pression responsable de l'apparition de la glace d'injection (fig. 16 c). Le problème qui subsiste est celui de l'alimentation pendant l'été de cette nappe d'eau située sous le pergélisol; ce problème est identique à celui qui se pose dans le cas d'un système ouvert, car là aussi, l'eau arrive sous le pergélisol. On peut se demander d'ailleurs si les pingos que G. W. Holmes, D. M. Hopkins et H. L. Foster (1963) signalent sur des crêtes d'interfluves n'ont pas une origine identique et donc, si certains pingos attribués à un système ouvert, ne sont pas en réalité engendrés par un système fermé temporaire qui se constitue au moment du gel hivernal.

### C) Les involutions périglaciaires.

La littérature se rapportant aux involutions est tellement abondante et il est possible d'y trouver des opinions si divergentes qu'il nous paraît indispensable en abordant ce chapitre de présenter une mise au point de la question. Nous nous efforçons spécialement ci-dessous d'indiquer la place des hypothèses périglaciaires dans l'ensemble des théories qui ont été avancées pour rendre compte des involutions.

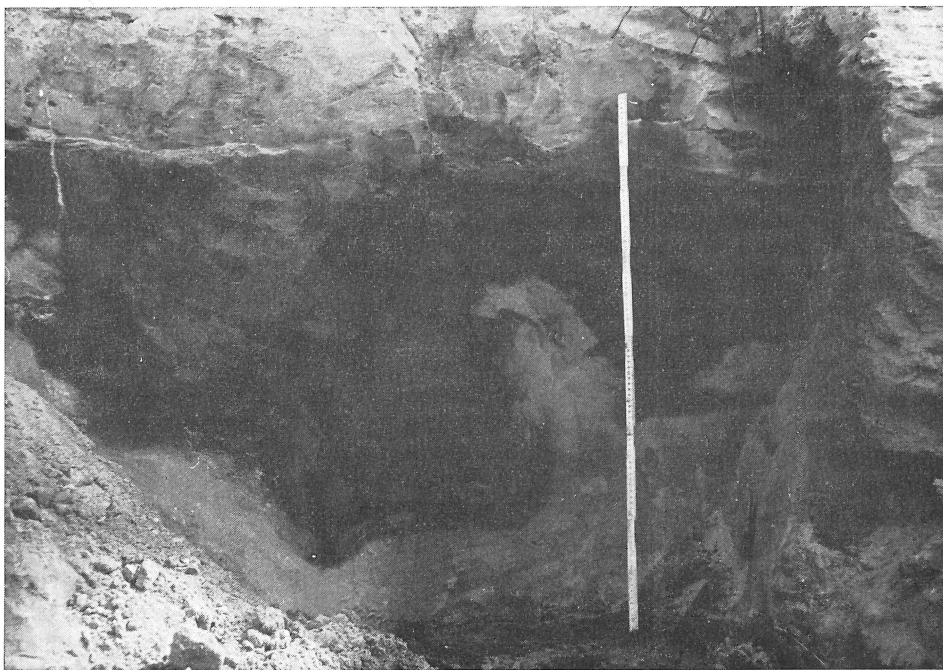


Fig. 18. — Involution périglaciaire dans des sables purs et humifères en Yakoutie (août 1969).

une hausse temporaire du niveau de la mer a entraîné la fusion du pergélisol dans les baies submergées. Lorsque plus tard l'abaissement du niveau de la mer a permis au pergélisol de se reconstituer, des enceintes fermées sont apparues qui ont donné naissance à des pingos.

## NOMENCLATURE.

En dénommant *involutions* toutes les perturbations de la disposition originelle d'une formation, A. JAHN (1956, p. 169) souligne que l'on ne s'engage pas en ce qui concerne leur origine et que l'on réserve entièrement l'interprétation. Nous savons très bien que cette utilisation du mot *involution*, adoptée ici, s'écarte de la signification qui lui est accordée en Amérique du Nord où le terme est appliqué seulement avec déformations dues aux alternances de gel et de dégel. Afin de lever toute équivoque, nous appellerons *involutions périglaciaires* (fig. 18) les structures qui appartiennent à la catégorie générale des phénomènes dits de cryoturbation (EDELMAN, 1935) ou de congéliturbation (K. BRYAN, 1946).

Parmi les involutions périglaciaires, J. DYLIK (1952) a distingué 2 types différents d'involution : les *involutions libres* qui apparaissent dans des formations hétérogènes et prennent naissance par le mouvement de particules individuelles et les *involutions liées* formées à la suite du déplacement de couches entières les unes par rapport aux autres. Au sein des involutions liées, A. JAHN (1956, p. 170) a proposé de distinguer les *plications* qui sont de simples plissements des couches, les *involutions en piliers* comportant des plis plus importants avec interruption des strates et les *involutions amorphes* brouillant la structure originelle. A côté de ces formes, existent encore les *injections* (CAILLEUX et TAYLOR, 1954, p. 77) dont l'aspect en coin suggère une genèse particulière, précisée par le nom qui leur a été donné, à savoir l'injection de matériaux dans les formations voisines.

## LES HYPOTHÈSES GÉNÉTIQUES.

Les involutions ont été fréquemment décrites en divers pays, surtout depuis 1930. W. VAN LECKWIJCK et P. MACAR signalaient déjà en 1949, et rien qu'en Allemagne, 26 références de travaux où il était question de ces structures. Comme au cours des vingt dernières années les publications se rapportant à ce sujet se sont multipliées dans tous les pays ayant subi un climat froid pendant le Quaternaire, il n'est pas possible de présenter une revue complète de tout ce qui a été publié sur cette question. Nous nous limiterons ici à énoncer les principales théories génétiques qui ont été avancées. A. JAHN, en 1964, a souligné qu'il convenait de distinguer les involutions où le froid ne joue aucun rôle, celles qui sont dues indirectement à l'action du gel et celles qui sont liées directement à la congélation des sols. Nous suivrons cet ordre pour présenter les explications qui ont été invoquées pour rendre compte de ces structures.

a) *Les involutions non périglaciaires* (\*) (indépendantes des conditions de température).

Plusieurs auteurs ont récemment attiré l'attention sur le fait que des involutions peuvent apparaître indépendamment de tout gel. S. DZULYNSKI (1963, 1965, 1966) a notamment publié plusieurs articles où il présente des expériences de laboratoire effectuées entre autres dans des argiles et des sables gorgés d'eau et donnant naissance à des structures identiques à celles qui ont été décrites comme périglaciaires. Les déformations apparues sont dues aux différences de densité des lits superposés, et sont des structures bien connues dans la littérature géologique sous le nom de « load casts ». J. SINTA (1962) a montré aussi par des expériences que des gaz

(\*) Nous omettons volontairement dans cette discussion de passer en revue toutes les déformations qui peuvent être dues à des causes telles que la poussée des glaciers, les phénomènes de tassement dus à la dissolution, les glissements de terrain, etc.

biogénétiques venant de couches contenant des matières organiques sont capables de provoquer des perturbations dans les couches supérieures de sables et de loess. Ces perturbations, quoique de petite taille, ressemblent à des involutions périglaciaires. Des effets semblables ont été obtenus par le même auteur en alimentant en eau des couches de loess entièrement desséchées. L'air compris dans le sol est mis lors de l'hydratation sous pression par l'eau capillaire qui pénètre entre les grains. Il s'échappe alors en donnant naissance à des déformations.

Il ne fait aucun doute que les mécanismes invoqués ci-dessus peuvent donner des déformations mais ces phénomènes ne peuvent se produire que dans des sédiments meubles, entièrement gorgés d'eau et très plastiques. Si l'on veut y voir l'origine des involutions, il faut donc encore expliquer comment et pourquoi le sol est devenu, au moins temporairement, si fluide. Le paragraphe suivant nous permet de comprendre quelle réponse est souvent donnée à cette question.

b) *Les involutions liées indirectement à l'action du gel.*

Des involutions peuvent apparaître par des processus identiques à ceux que nous venons de mentionner, mais à la suite de l'action du gel. C'est ainsi que certains auteurs tels E. PFUL (1932) ont écrit que dans le mollisol gorgé d'eau et très fluide, des couches plus denses surmontant des couches plus légères ont pu donner naissance à des « load casts ». O. NORDENSKJÖLD (1909) a supposé quant à lui que cette transformation du sol en une masse très fluide a pu être à l'origine de courants de densité dus à des différences de température. A. R. LOW (1925) et K. GRIPP (1926, 1927) ont expliqué de la sorte cryoturbations et sols polygonaux et cette hypothèse a été reprise par beaucoup d'auteurs par la suite. Si des mouvements de densité dus à de simples différences de température paraissent aujourd'hui impossibles, ceux qui proviennent des différences de teneur en eau sont au contraire très vraisemblables. Autrement dit, l'apparition de « load casts » typiques lorsque au moment du dégel le sol est à l'état solifluidal paraît très possible.

Les mouvements de ce type ne peuvent pas expliquer toutes les involutions non seulement parce qu'il nous semble douteux (vu les modifications de structure du sol dont nous avons parlé précédemment) que le sol puisse être transformé sous l'action du dégel en une masse véritablement fluide, mais encore parce que les déformations observées ne peuvent pas toujours être expliquées par ce processus. Ainsi, les montées de masses d'argile au milieu de gravières et de sables telles que A. DYLIKOWA (1961) les a décrites ne peuvent résulter de tels mouvements de densité.

c) *Les involutions liées directement à l'action du gel.*

La majorité des publications parues au cours des dernières années admettent que les involutions périglaciaires sont des déformations apparues lors du gel au sein d'une masse qui n'était pas nécessairement très plastique. Presque toutes expliquent qu'elles résultent de pressions engendrées par la transformation en glace de l'eau contenue dans le sol. Différents mécanismes ont cependant été invoqués :

a) Déformations dues à la congélation de l'eau au sein d'un système fermé :

L'hypothèse la plus communément admise pour expliquer les involutions fait appel à ce que A. L. WASBURN a dénommé en 1950 la « pression cryostatique ». Selon cet auteur, cette explication aurait été proposée dès 1914 par K. GLINKA et défendue aussi en 1942 par R. P. SHARP. Elle consiste à voir dans les involutions la conséquence de l'apparition d'une poche fermée de matériaux non gelés, poche entourée de toutes parts de formations déjà prises par le gel. Si ces matériaux non gelés contiennent de l'eau, la congélation de celle-ci va engendrer une pression qui entraînera, soit

la déformation des parois de la poche (involution), soit l'injection de matériaux au sein d'une fissure brusquement apparue (injection). Il est facile de concevoir l'apparition de semblables enceintes au moment de la « soudure » annuelle entre le pergélisol et la zone active, étant donné que le sol n'est pas strictement homogène et que la teneur en eau (qui détermine essentiellement la vitesse de pénétration du gel) varie d'un endroit à l'autre. Pour autant que le sol soit saturé, le mécanisme doit être efficace et provoquer des mouvements appréciables. Toutefois, il est possible que si des vides existent dans le sol, la pression dégagée soit beaucoup plus faible, la dilatation de l'eau entraînant seulement la mise sous pression de l'air inclus dans les pores du sol.

*b) Déformations liées au soulèvement des cailloux par le gel :*

Le soulèvement des cailloux par le gel a été également invoqué comme un processus responsable de certaines involutions. C'est ainsi que T. CZUDEK (1964) pense que ce mécanisme est intervenu dans l'apparition de cryoturbations affectant le contact entre la partie limoneuse du sol et le substratum sous-jacent désagrégé en de très nombreux débris de schistes.

Il ne fait aucun doute, étant donné l'importance des processus de soulèvement par le gel dont nous avons parlé précédemment que ce mécanisme peut effectivement intervenir dans les déformations de couches, du moins lorsque des éléments assez volumineux sont concernés.

*c) Déformations liées à la congélation différentielle du sol :*

D. M. HOPKINS et R. S. SIGAFOOS (1951) expliquent les thufurs (et les involutions qui existent en-dessous) par un gel moins rapide sous une touffe de végétation que dans la partie voisine. Le matériel « mis sous pression par le gel » trouve donc sous la butte un exutoire qui force le thufur à s'élever. Une couverture végétale inégale avait déjà été invoquée pour expliquer des phénomènes semblables par BESKOV (1930, p. 328), par J. LUNDQUIST (1962, p. 32), par H. M. RAUP (1963) et par M. J. C. CHAMBERS (1966).

R. P. SHARP, en 1942, pense que des masses irrégulières de glace du sol doivent produire des structures réfléchissant leurs irrégularités. Au dégel, les déformations doivent être également importantes et compliquer les formes déjà produites. A. BAHR, en 1932, avait formulé un avis semblable en considérant que le gel du mollisol se produit à partir de centres locaux conditionnés par l'hétérogénéité du sédiment. Des paquets gelés en voie d'accroissement existent au milieu de matières non encore gelées et plus ou moins plastiques qui subissent de ce fait des pressions et se déforment. P. BOUT (1953) invoque, quant à lui, l'apparition de glace de ségrégation qui détermine une augmentation de volume du sol. Comme cette augmentation de volume ne peut se libérer vers le haut, du moins quand la congélation atteint 2 ou 3 mètres, elle détermine, dit-il, l'apparition d'apophyses dans les couches sous-jacentes encore plastiques.

A. DYLIKOWA, en 1961, dans un excellent article où elle décrit différents types de cryoturbations, les explique comme le résultat de la congélation de matériaux non homogènes. Comme ceux-ci contiennent une quantité d'eau variable, il se produit une dilatation inégale provoquant des mouvements au sein du sol. L'auteur signale ainsi que l'eau du sol est, soit libre, soit tenue par des forces capillaires, et que, en conséquence, elle gèle à des températures variables (\*). Elle pense que

(\*) A. DYLIKOWA, 1961, p. 10 : « Les parties plus sablonneuses contiennent de plus grandes quantités d'eau libre ou capillaire gelant beaucoup plus rapidement, déjà

les cryoturbations ne sont pas uniquement liées à la « soudure » zone active-pergélisol; les mouvements se produiraient à la partie inférieure de la zone qui gèle par « dilatation différentielle » selon la nature du matériel. Les mouvements annoncés se poursuivraient au moment du dégel.

#### d) Conclusion.

Les hypothèses que nous venons de rappeler donnent une idée de la diversité des explications proposées pour rendre compte des cryoturbations. La principale critique qui peut être formulée à ces théories est qu'elles ne précisent pas assez comment se produisent les mécanismes auxquels elles font appel. Ainsi, l'hypothèse de D. M. HOPKINS et R. S. SIGAFOOS (1951) ne peut se produire qu'à la condition que le sol soit mis sous pression par le gel. Or, la pression ne dépasse celle qu'exerce le poids de la couche gelée surincombante que si un système fermé se constitue. R. P. SHARP (1942), pour sa part, n'explique pas la raison pour laquelle apparaissent des masses irrégulières de glace dans le sol ... Mais nous ne voulons pas nous lancer ici dans la critique, dangereuse et difficile, de toutes les hypothèses qui ont été émises. Nous voulons seulement montrer ci-dessous qu'un pas important dans la connaissance de ces structures peut résulter de travaux expérimentaux.

### 3. EXPÉRIENCES DE LABORATOIRE — MESURES DE PRESSION AU SEIN DE BOUE SE CONGELANT.

Afin de mieux connaître les processus jouant un rôle dans ces déformations, nous réalisons depuis plusieurs années des expériences de laboratoire (\*). Celles-ci sont de deux types : d'une part nous avons étudié les déformations qui se produisent dans des bacs de limon stratifié, et d'autre part nous avons mesuré les pressions qui se développent et les mouvements qui y sont associés au sein de bacs de boue subissant l'action du gel. Les involutions périglaciaires doivent, en effet, résulter de différences apparaissant au cœur de masses de sédiments. Nous présenterons brièvement ici quelques résultats des mesures de pression qui mettent en évidence les forces développées par la dilatation de l'eau se transformant en glace. La figure 19 montre les 3 situations dans laquelle peut se trouver la jauge de pression au cours des expériences.

*Jauge de pression sous la couche gelée, dans un bac dont les parois sont recouvertes de graisse. En système ouvert (fig. 19 a).*

La jauge de pression est immergée dans un bac de boue dont la partie supérieure gèle. Les parois du bac sont recouvertes de graisse de telle sorte qu'aucune adhérence entre celui-ci et le sol gelé ne soit possible. Dans ces conditions aucune variation de pression n'a été enregistrée.

La seule augmentation de pression que nous pourrions observer dans ces conditions résulterait d'un alourdissement de la partie supérieure du sol. Une telle augmentation de poids est effectivement réalisée par migration de l'eau vers la zone de gel où elle se transforme en glace de ségrégation. Elle est cependant trop

à une température de 0° C, tandis que les parties argilo-limoneuses se distinguant par la grande quantité d'eau capillaire, ne gelaient qu'à une température un peu inférieure à 0° C. »

(\*) Je remercie très vivement Monsieur Henri COURTOIS, technicien au Laboratoire de Géographie physique de l'Université de Liège qui a réalisé, avec beaucoup de persévérance et de compétence de nombreuses expériences dont nous n'exposons ici que quelques résultats.

faible non seulement pour être mesurée mais encore pour donner naissance à des mouvements quelconques.

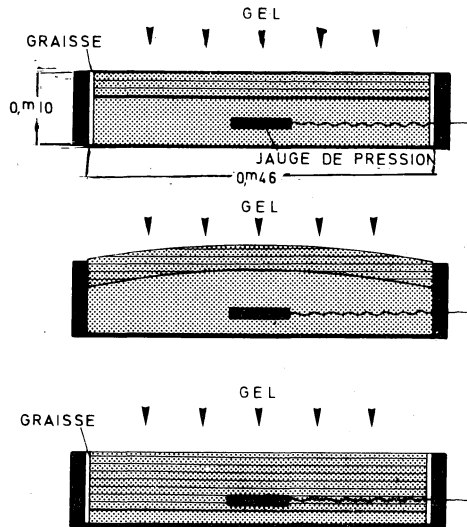


Fig. 19. — Trois localisations possibles de la jauge de pression au cours de nos expériences : a) sous la zone gelée qui n'adhère pas aux bords du bac (système ouvert); b) sous la zone gelée qui adhère aux bords du bac (système fermé); c) au sein de la masse gelée.

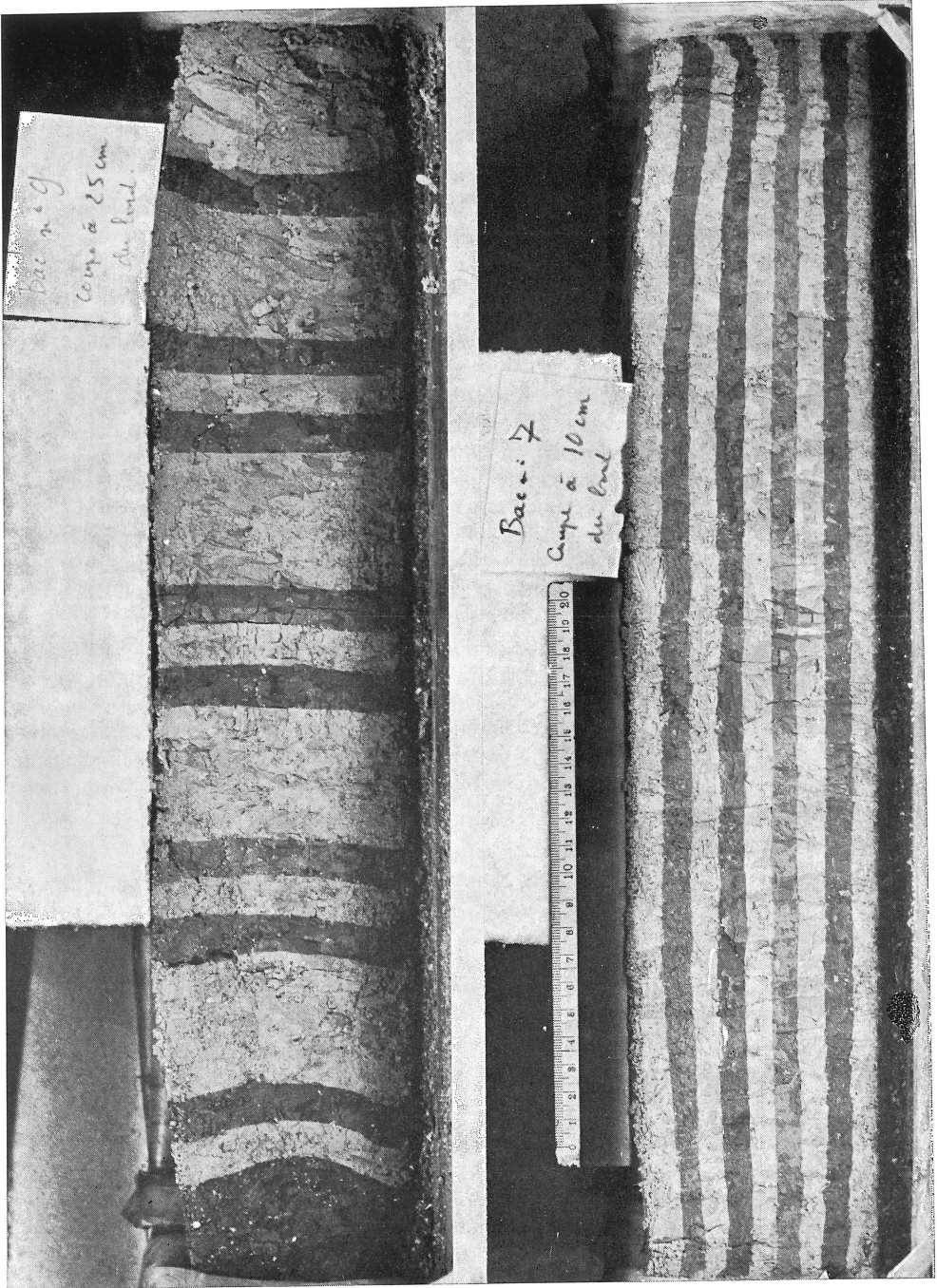
Cette observation ne paraît, à première vue, pas exclure l'apparition de mouvements directement en-dessous de la masse en train de geler à la suite de la croissance locale de glace de ségrégation (hypothèse de P. BOUT, 1953). De tels efforts semblent cependant peu probables pour deux raisons :

a) comme la quantité de frigories nécessaire pour transformer l'eau en glace est très importante, là où une lentille de glace ne se constitue pas, le gel pénètre très vite; il progresse rapidement jusqu'à ce qu'il arrive à l'endroit où grandit une autre lentille de glace de ségrégation. De ce fait, la croissance de lentilles de glace est relativement régulière sur tout le front de gel.

b) Ainsi que nous l'avons vu précédemment, l'apparition d'une pression ralentit la croissance de la glace de ségrégation. Ce facteur s'ajoute à celui que nous venons de mentionner ci-dessus pour expliquer que la glace apparaisse en quantité équivalente, au cours du même laps de temps, le long de tout l'isotherme de  $0^{\circ}\text{C}$ .

Fig. 20. — Déformations que présentent des couches horizontales et verticales de limon éolien artificiellement coloré, après avoir subi 10 cycles gel-dégel depuis la surface. Au début de chaque gel, les couches étaient gorgées d'eau. Les parois du bac n'étaient pas recouvertes de graisse, ce qui a permis l'apparition de « systèmes fermés ». Les surfaces des deux bacs montrent des soulèvements en dôme résultant d'un déplacement du limon des bords vers le centre. Sur la surface du bac stratifié verticalement un morceau d'isolant thermique (frigolithe) était posé : des soulèvements se sont produits en bordure de l'isolant. (Longueur des bacs 45 cm).





*Jauge de pression sous la couche gelée, en l'absence de graisse sur les parois. En système fermé (fig. 19 b).*

La jauge de pression est ici encore en-dessous de la partie subissant le gel, mais dans un bac de boue où rien n'empêche l'adhérence du sol gelé contre les parois du bac. Dans ce cas, sitôt que la partie supérieure de la masse de boue est gelée, il se constitue un *système fermé* et la congélation ne peut se poursuivre qu'en entraînant la déformation de la couche supérieure gelée (pression cryostatique de WASBURN, 1950).

Les pressions enregistrées pendant que ces déformations se produisent sont faibles, car la déformation lente d'une couche gelée peu épaisse et à une température voisine de 0° C est facile. Ces deux conditions sont remplies dans le cas de nos expériences. En effet, elles ont été réalisées dans des bacs de boue ne dépassant pas 10 cm d'épaisseur et où, de ce fait, la couche supérieure gelée est toujours peu épaisse. Par ailleurs, tant que toute la masse n'est pas entièrement congelée, la température s'abaisse lentement, car la transformation d'eau en glace libère des calories. La température ne fluctue rapidement que lorsque tout le sol est gelé.

Ces faibles pressions provoquent cependant dans la masse de boue des déformations appréciables. La figure 20 en montre les caractères : la surface se bombe en dôme et les mouvements sont particulièrement importants à proximité des bords. En ces endroits en effet, l'adhérence contre les parois empêche toute expansion verticale, et il en résulte, à chaque gel, un mouvement de matières vers le centre du bac. Cet effet de paroi est important et s'observe dans les champs de sols polygonaux périglaciaires, par l'existence d'une légère dépression dans le matériel fin au contact de gros blocs ou de parois rocheuses.

Des expériences ont été réalisées en déposant sur une portion de la surface du sol en train de geler un morceau d'isolant thermique (styropore expansé). En cet endroit, le sol gèle moins rapidement et reste de ce fait plus plastique. Des déformations s'y produisent plus facilement, et sous cet isolant le sol se soulève plus que dans les régions voisines (fig. 20). Cette expérience apporte une confirmation expérimentale à l'hypothèse de D. L. HOPKINS et R. S. SIGAFOOS (1953) que nous avons rappelée précédemment.

*Jauge de pression prise au sein du sol gelé (fig. 19 c).*

Après que la jauge ait été prise dans le sol gelé, des variations de pression importantes, atteignant 1 kg par cm<sup>2</sup>, ont été enregistrées. Ces variations de pression engendrent des déformations plastiques de la masse consolidée par le gel; le fait que des pressions ont pu être enregistrées, le montre déjà, car cet enregistrement ne peut se faire que par déformation du tympan de la jauge soit du sol gelé qui l'entoure. Nous présenterons ici, avec l'interprétation provisoire, à laquelle nous sommes arrivés, deux courbes que nous avons enregistrées, l'une à la partie inférieure et l'autre au milieu de bacs de boue de 10 cm d'épaisseur. Le matériel était constitué de limon éolien sursaturé d'eau dont la surface a été exposée à un gel lent.

1. Jauge de pression à la partie inférieure d'un bac de boue (fig. 19).

Au cours de cette expérience, la chambre froide était réglée pour atteindre et garder constante une température de — 16° C. La courbe de température (fig. 21) montre un refroidissement rapide au-dessus de 0° C, un long palier à 0° C au moment de la congélation de l'eau libre, et, sous 0° C, un refroidissement plus lent qu'au départ.

Ce refroidissement plus lent est dû, non seulement à la transformation d'eau

capillaire en glace, mais aussi à l'approche de la température d'équilibre. Celle-ci, si l'expérience avait été poursuivie assez longtemps se serait établie à l'emplacement de la sonde à une valeur proche de  $-9^{\circ}\text{C}$ . La différence entre la température de la surface du bac ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) et celle qui s'établit en profondeur résulte de la mauvaise isolation thermique de la partie inférieure du bac de boue.

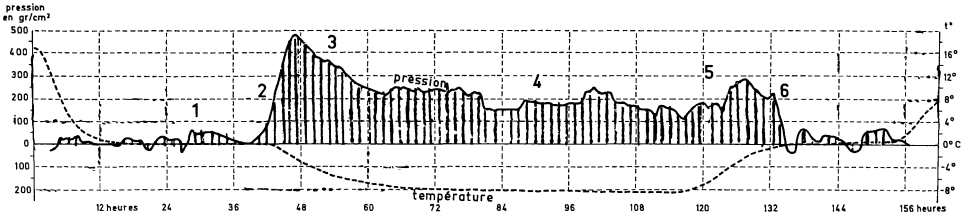


Fig. 21. — Courbes des variations de pression et de température enregistrées au sein (8,5 cm de profondeur) d'un bac de boue en train de geler. Les numéros inscrits sur la figure sont repris dans le texte.

Au moment du dégel, un long palier à  $0^{\circ}\text{C}$  apparaît également. Il s'explique par la quantité importante de calories nécessaires pour transformer en eau la glace qui fond à cette température.

Quant à la courbe des pressions, elle montre tout d'abord de légères fluctuations, généralement positives; celles-ci accompagnent probablement des déformations du sol dues à l'adhérence de la boue gelée sur les parois, déformations que nous avons décrites ci-dessus au paragraphe b. Lorsque la température est un peu inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$ , la pression augmente considérablement. Cette pression est due à ce que toute l'eau du sol ne gèle pas à  $0^{\circ}\text{C}$ . L'eau capillaire gèle à une température inférieure, au milieu d'un squelette déjà cimenté par de la glace provenant de la congélation de l'eau libre. L'augmentation de volume rencontre de ce fait une résistance et une pression positive apparaît. Celle-ci s'accroît rapidement (partie n° 2 de la courbe) puis brusquement s'abaisse (3 sur la courbe). Cette chute de pression est due à la déformation de la masse en train de geler lorsque la pression dépasse la résistance du matériel. Dans plusieurs expériences, cette chute de pression est extrêmement brutale (voir fig. 22, par exemple) et semble provenir du relâchement rapide de la pression apparue à proximité immédiate de la jauge. Sur la figure 21, la chute de pression est par contre assez lente. Elle résulte vraisemblablement de déformations plus profondes qui donnent à la masse gelée une forme bombée et provoquent ainsi un étirement de la masse supérieure. Comme dans l'expérience que nous examinons ici, le tympan de la jauge est placé verticalement, cet étirement se traduit par une dépression. Lorsque la température était voisine de  $-9^{\circ}\text{C}$  et s'abaissait lentement, des variations de pression anarchiques ont été enregistrées (4 sur la courbe). Nous en ignorons la cause. L'allure générale de cette partie de la courbe montre cependant bien une légère baisse de pression qui peut s'expliquer aisément, comme nous l'avons proposé ci-dessus, par une déformation en dôme de toute la masse.

Le réchauffement détermine entre  $-9^{\circ}\text{C}$  et  $-2^{\circ}\text{C}$  une augmentation de pression (5 sur la courbe) qui paraît symétrique de la baisse de pression n° 3. Il s'agirait ici du retour à l'état liquide de l'eau capillaire déterminant au sein du sol gelé des tensions inverses de celles que nous avons invoquées ci-dessus. Enfin, en dessous de  $-2^{\circ}\text{C}$  (6 sur la courbe), la fusion d'une grande quantité de glace

détermine à proximité immédiate de la jauge une diminution de volume qui permet la disparition de la pression résiduelle.

La pression maximum enregistrée au cours de nos expériences dans nos bacs de boue de 10 cm d'épaisseur est un peu supérieure à  $1,5 \text{ Kgr/cm}^2$  (\*). La valeur de cette pression dépend essentiellement de la résistance à la déformation de la couche gelée. La pression varie donc, non seulement avec la quantité d'eau capillaire, c'est-à-dire avec la granulométrie du matériel, mais encore avec l'épaisseur et la température de la couche gelée supérieure.

## 2. Jauge de pression au milieu du bac de boue (fig. 22).

La figure 22 donne les courbes de pressions et de températures observées au milieu d'un bac de boue (5 cm de profondeur) constitué également de limon éolien. La température de la chambre froide était ici de  $-16^\circ \text{C}$ .

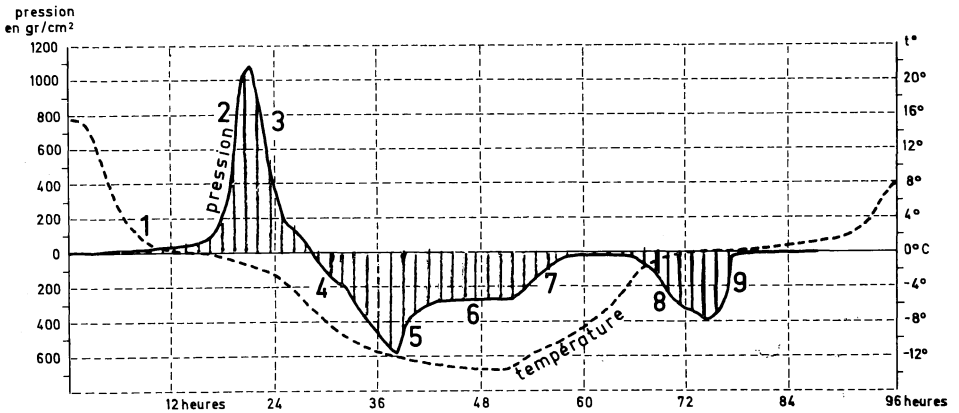


Fig. 22. — Courbes des variations de pression et de température enregistrées au milieu (5 cm de profondeur) d'un bac de boue en train de geler. Les numéros inscrits sur la figure sont repris dans le texte.

La courbe qui figure les variations de température est identique à celle que nous venons de décrire ci-dessus, aussi nous ne nous y attarderons pas. Par contre, les fluctuations de pressions paraissent à première vue plus compliquées. Nous allons les examiner attentivement en fournissant l'interprétation qui nous paraît actuellement la plus probable.

Nous retrouvons sur cette courbe l'augmentation de pression (n° 2 sur la courbe 22) déjà décrite et due à la congélation de l'eau capillaire. Cette augmentation est suivie par une brusque chute de pression (n° 3) qui correspond comme nous l'avons vu à une déformation plastique. Ensuite apparaît sur le graphique une lente chute de pression (n° 4) qui se poursuit bien au-delà de la valeur de la pression atmosphérique. Répétons que cette chute de pression résulte des déformations qui se produisent en-dessous de la jauge de pression par la congélation de l'eau capillaire. Ces déformations provoquent en effet le soulèvement en dôme de la masse gelée et déterminent à la partie supérieure du matériel gelé un étirement qui se traduit par une dépression. Cette tension s'accroît jusqu'à ce qu'elle dépasse

(\*) Au cours d'expériences réalisées au début de 1970, nous avons enregistré des pressions dépassant  $4 \text{ Kgr/cm}^2$ . Ces pressions ont été mesurées au sein de blocs de limon placé au milieu de sables gorgés d'eau.

la limite de la résistance des couches gelées et produise une déformation plastique (n° 5). Après ce mouvement, la pression résiduelle (6) est équivalente à la tension que peut supporter le matériel gelé à la température atteinte. Le réchauffement de la température engendrant la fusion de la « glace capillaire », il en résulte un mouvement plastique inverse de celui que nous avons décrit en (4), mouvement qui détermine une nouvelle augmentation de pression (7). La chute de pression (8) qui survient ensuite résulte de la diminution de volume accompagnant la fusion de la glace. La dernière variation de pression (9) est le retour à la pression atmosphérique lorsque la masse de limon est, avec le dégel, redevenue pâteuse.

#### 4. CONCLUSION.

Ces expériences établissent la validité de plusieurs hypothèses génétiques rappelées précédemment. Elles montrent tout d'abord la réalité de l'hypothèse périglaciaire la plus généralement admise pour rendre compte des involutions : à savoir celle de la pression cryostatique apparaissant quand un système fermé se constitue. Elles soulignent que des pressions s'exercent au sein du sol quand la température s'abaisse en-dessous de 0° C. Ces pressions ont pour origine la congélation de l'eau capillaire qui se produit à des températures comprises entre 0° C et — 22° C. Elles provoquent des réelles déformations qui dans nos expériences sont mesurées par des « transducteurs déplacement », et des jauges de contrainte. Ces pressions et ces mouvements ne sont pas liés à la zone étroite de la soudure zone active-pergélisol, comme la pression cryostatique, mais ils apparaissent à chaque gel au sein de toute la masse. Étant donné que la quantité d'eau capillaire est réduite, les déplacements sont évidemment de peu d'importance, mais, ils se reproduisent lors de chaque gel dans le même sens, et, de ce fait, petit à petit les mouvements cumulés doivent être considérables.

D'autres expériences que celles que nous avons rapportées ici ont clairement montré une relation entre la granulométrie du matériel, l'importance des pressions et celle des déformations. Les mouvements sont d'autant plus considérables que la quantité d'eau capillaire est élevée, et ils sont donc plus importants dans les argiles que dans les limons, et dans les limons que dans les sables. Il ne reste en conséquence aucun doute que, dans un milieu où existent des matériaux de diverses granulométries, des efforts différentiels se produisent. Le résultat de ceux-ci n'est pas évident. D'une part, le matériel fin contenant beaucoup d'eau capillaire présente, à une température inférieure à 0° C, une plasticité plus grande que le matériel grossier voisin et ainsi il paraît susceptible d'encaisser des déformations à la suite de sa congélation. D'autre part, des pressions s'y développent alors que toute l'eau du matériel grossier voisin est déjà transformée en glace. Il en résulte que ce sont les éléments fins qui présentent le plus de mobilité et qui vont subir les plus grands déplacements. Ceux-ci se produisent vers la zone de moindre résistance, ce qui ne signifie pas nécessairement en direction de la surface. C'est seulement lorsque la soudure est réalisée avec le bed rock ou le pergélisol sous-jacent, que la relaxation de la tension engendrera nécessairement des déplacements vers la surface. En l'absence d'un substrat moins rigide que la couche supérieure gelée, des déformations pourront se produire vers le bas.

Nos expériences soulignent, de toutes façons, que des mouvements s'effectuent indépendamment de l'existence d'un pergélisol et donc, que les involutions périglaciaires peuvent se constituer sous un climat où la température moyenne annuelle est moins basse que beaucoup ne l'ont supposé. Elles rappellent d'autre part que tous les phénomènes résultant de la congélation ne se produisent pas au moment où

la température franchit le seuil de  $0^{\circ}\text{C}$ . Le gel de l'eau capillaire s'effectue au contraire à des températures inférieures. Il en résulte que des fluctuations de température sous  $0^{\circ}\text{C}$ , fluctuations d'autant plus faciles qu'elles peuvent se produire sans la fusion de toute la glace du sol, ont des effets géomorphologiques : elles peuvent déterminer, comme nous venons de le dire, l'apparition de mouvements plastiques au sein du sol, ou encore, comme nous allons le voir maintenant, des actions de gélivation.

#### D) La gélifraction.

La gélifraction est le processus qui provoque la fracturation des roches sous l'action du gel. Réputé être l'agent de désagrégation le plus efficace à la surface du globe, son action a été étudiée expérimentalement par plusieurs chercheurs. Ceux-ci se sont plus intéressés à définir le résultat de différents cycles de gel et de dégel sur diverses roches que de préciser le détail du mécanisme responsable de l'apparition des pressions qui brisent les roches. Ces expériences ont cependant démontré que le gel sec était inefficace (TRICART, 1956) ce qui implique que la gélifraction est bien le résultat de la transformation d'eau en glace.

J. MALAURIE, dans une publication récente (1968) a cherché à mieux définir les conditions nécessaires pour que se produisent des phénomènes de gélifraction. Il a spécialement insisté sur le fait que le processus ne pouvait intervenir que si une enceinte fermée se constituait. En outre, il a repris l'idée déjà affirmée par J. TRICART et A. CAILLEUX (1967) que les pores devaient être remplis d'eau, en précisant que le volume d'eau devait atteindre au moins 90 % du volume des vides. Étant donné que la gélifraction s'exerce au départ de fissures ouvertes, puisque l'eau doit y parvenir, la constitution d'une enceinte fermée dans ces fissures ne peut se faire que par l'apparition d'un bouchon de glace. Dans le détail, cette obturation peut se produire de deux manières différentes. La première, prévue par J. MALAURIE (1968), a pour point de départ le refroidissement plus rapide de l'extérieur de la roche

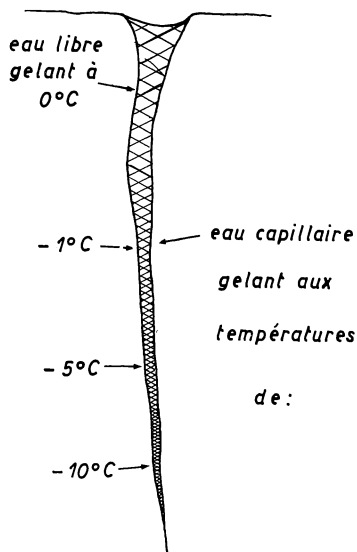


Fig. 23. — Températures de congélation de l'eau capillaire dans une fissure se rétrécissant de plus en plus en profondeur.

que du centre, ce qui implique le gel de l'eau située près de la surface avant le gel de l'eau plus profonde. La seconde nous est directement suggérée par les résultats des mesures de pression dans les sols, résultats donnés ci-dessus. En admettant que les fissures soient très fines, et de plus en plus minces en profondeur, l'eau qui y pénètre est tenue par la tension superficielle sous une pression d'autant plus forte que la fissure est mince. Elle gèlera donc à une température d'autant plus basse qu'elle a pénétré loin dans cette fissure (fig. 23). Il en résulte que, au cours d'un refroidissement de la roche, la congélation de plus en plus tardive de l'eau en profondeur va nécessairement, au cours du refroidissement progressif, engendrer l'apparition d'un système fermé.

Vu sous cet angle, il est possible de comprendre l'importance de l'intensité du gel déjà signalée par plusieurs auteurs et notamment par J. TRICART (1956), A. GODARD et F. HOUEL-GANGLOFF (1965) à la suite d'essais de gélifraction. L'eau capillaire comprise dans les fissures de la roche ne gèle pas seulement à 0° C, mais à des températures variables entre 0° C et -22° C suivant les forces capillaires qui la tiennent. Avec l'intensité du gel, non seulement la pression dégagée par l'eau qui ne trouve pas la place pour se dilater, augmente, mais encore, la quantité d'eau capillaire qui tend à se transformer en glace s'accroît. Il est ainsi possible de comprendre que des gels à des températures très inférieures à 0° C déterminent la fracturation de roches mécaniquement très résistantes qui subiraient presque sans dommage des gels moins intenses. On peut supposer aussi que des fluctuations de la température restant en dessous de 0° C puissent contribuer à la rupture de la roche par un effet de « fatigue » résultant des pressions que les efforts de congélation de l'eau capillaire font fluctuer au sein de la roche.

Il est bien évident qu'une étude théorique complète de la gélifraction doit comprendre d'autres aspects comme celui de la pénétration de l'eau dans la roche ou celui de l'action éventuelle de la prise brutale par le gel d'eau en surfusion, aspects que J. MALAURIE (1968) a considérés; mais, nous voulons seulement souligner ici le mécanisme de gel qui nous paraît être fondamental dans la compréhension de l'éclatement des roches.

#### IV. CONCLUSION GÉNÉRALE

Le présent travail ne constitue pas un inventaire exhaustif des processus responsables des formes et des structures périglaciaires, mais considère seulement l'action des trois plus importants mécanismes liés au gel. A côté de ceux-ci, bien d'autres processus existent qui sont certainement toujours inconnus. Deux découvertes récentes en montrent des exemples, à savoir la répulsion des particules les plus fines du sol par la glace en croissance (fig. 10, expériences de A. E. CORTE, 1966) et l'existence de déformations du sol congelé au moment du gel de l'eau capillaire (voir chapitre III, § 3 : mesures des variations de pression au sein de masses de boue en train de geler). Bien que, pour ne pas allonger le texte, nous n'ayions pas donné ici tous les détails de chaque mécanisme et que certainement nous ne les ayions pas cités tous, nous pensons avoir montré la diversité des conséquences liées à l'apparition d'un seul phénomène physique, comme par exemple la croissance de lentilles de glace de ségrégation.

En ce qui concerne la retraction thermique des sols, nous avons souligné que diverses catégories de fentes de gel devaient être distinguées et nous nous sommes efforcés de préciser les caractères qui permettent de les reconnaître. Bien entendu, cette classification devra être éprouvée et complétée à la lumière des nouvelles connaissances. Dans ce domaine, les progrès scientifiques sont liés principalement

à l'observation de coupes dans les régions périglaciaires actuelles. De telles descriptions sont malheureusement encore trop rares. En effet, dans l'arctique, les coupes naturelles sont peu fréquentes et la difficulté d'en dégager dans le pergélisol constitue un obstacle quasi insurmontable. L'utilisation d'une pompe portative permet cependant, par écoulement de l'eau sur des pentes, de dégager au sein du pergélisol des sections suffisantes. Cette technique que nous avons employée pour dégager les profils donnés sur les figures 4 et 5 devrait être plus largement utilisée. D'autre part, une classification des différentes fentes de gel permettra de préciser leurs conditions d'apparition. Il est certain à ce point de vue qu'il faudrait en savoir plus que la température moyenne annuelle de la région où elles apparaissent; cette simple donnée masque en effet les fluctuations de température qui se produisent au cours de l'année et qui sont cependant à l'origine de ces structures. Idéalement, ce sont les variations de température au sein du sol lui-même qu'il conviendrait de connaître.

S'il ne semble pas, que dans l'étude des fentes de gel des travaux expérimentaux puissent être aisément réalisés, car ils nécessiteraient des chambres froides très vastes et la manipulation de volumes de terre considérables, par contre, dans l'étude des autres processus liés au gel, les progrès scientifiques résulteront surtout, au cours des prochaines années, des recherches de laboratoire. Les expériences permettront non seulement de définir les processus encore mal connus, mais en outre, elles permettront d'étudier la combinaison des différents mécanismes qui, dans la nature sont concomitants et donnent naissance aux formes complexes, car polygénétiques, comme les petits polygones triés. Il est évident que la recherche expérimentale dans le domaine périglaciaire s'épanouit maintenant et qu'il est vivement souhaitable qu'une commission internationale soit créée pour promouvoir et coordonner ces travaux.

#### BIBLIOGRAPHIE

- BESKOW G., 1935. — Tjälbildningen och Tjällyftningen. Statens Väginstytut, Meddelande 48. *Sveriges Geologiska Undersökning*, Ser. C, n° 375, Stockholm, 242 p.
- BLACK R. F., 1952. — Polygonal patterns and ground conditions from aerial photographs. *Photogrammetric engineering*, vol. 18, p. 123-134.
- BLACK R. F., 1969. — Climatically significant fossil periglacial phenomena in North-central United States. *Biuletyn Peryglacjalny*, T. 20, p. 225-238.
- BOBOV N. V., 1960. — Present development of ground veins and small polygonal pattern in the area between river Lena and Viluj. *Trudy Inst. Mierzlot. im. Obruczeva*, T. 16, Moscow (cité par J. Dylik, 1966).
- BOUT P., 1953. — Études de géomorphologie dynamique en Islande. *Act. Scientif. et industr.* Coll. Hermann, 1197, 220 p., 43 fig., 22 pl., Paris.
- BOUYOUCOS G. J., 1916. — « Soil temperature ». Michigan Agricultural College, Exp. Sta., Technical bul., n° 26, 133 p.
- BRYAN K., 1946. — Cryopedology. The study of frozen ground and intensive frost-action with suggestions of nomenclature. *Amer. J. Sci.*, New Haven, T. 244, p. 622-642.
- CAILLEUX A. et TAYLOR G., 1954. — Cryopédologie, Étude des sols gelés. *Act. Scientif. et industr.*, Coll. Hermann, Paris, 218 p., 115 fig., 12 pl.
- CHAMBERS M. J. G., 1966. — Investigations on patterned ground at Signy island, South Orkney islands. I. Interpretation of mechanical analyses. *British Antarct. Surv. Bull.*, n° 9, 1966, p. 21-40.
- CORTE A. E., 1966. — Particle sorting by repeated freezing and thawing. *Biuletyn Peryglacjalny*, 15, p. 175-240.
- CRONEY D. and COLEMAN J. D., 1961. — Pore pressure and suction in soil. Conference



organized by the British National Society of the International Society of Soils Mechanics and foundation Engineering at the Institution of Civil Engineers hold on March 30th and 31st, 1960. London-Butterworths, 151 p.

- CZUDEK T., 1964. — Periglacial slope development in the area of the Bohemian Massif in Northern Moravia. *Biuletyn Peryglacjalny*, n° 14, p. 169-194.
- DANILOVA N. S., 1956. — Soil wedges and their origin. In data on the principles of the study of frozen zones in the earth's crust; Issue III. Publication de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., institut V. A. Obrutchev pour l'étude du permafrost. Moscou, 229 p. Technical translation 1088 du National Research Council of Canada.
- DOSTOVALOV B. N., 1960. — Tetragonal systems of ice and soil veins in loose rocks. Perigl. Phenomena on the territory of the U.S.S.R., ed. by K. K. Markov and A. I. Popov, Moscow. (Cité par J. Dylík, 1966).
- DYLIK J., 1952. — Periglacial structures in the Pleistocene deposits of Middle Poland *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 66.
- DYLIK J., 1956. — Coup d'œil sur la Pologne périglaciaire. *Biul. peryglacjalny*, 4, 195-238, Lodz.
- DYLIK J., 1966. — Problems of ice-wedge structures and frost fissures polygons. *Biuletyn Peryglacjalny*, n° 15, p. 241-291, Lodz.
- DYLIK J., 1967. — The main elements of upper pleistocene paleogeography in Central Poland. *Biuletyn Peryglacjalny*, n° 16, p. 85 à 116, Lodz.
- DYLIKOWA A., 1961. — Structures de pression congélistatique et structure de gonflement par le gel de Katarzynow près de Lodz. *Bull. Soc. Sciences et Lettres de Lodz*. Vol. 12, n° 9, p. 1 à 23.
- DZULYNSKI S., 1963. — Polygonal structures in experiments and their bearing upon some periglacial phenomena. *Bull. Acad. Polon. Sciences, Série Sc. Geol. et geogr.*, XI, n° 3, p. 145-150.
- DZULYNSKI S., 1965. — Experiments of clastic wedges. *Bull. Acad. Polon. Sciences, Ser. Sc. Geol. et Geogr.*, V. XII, n° 4, p. 301-304.
- DZULYNSKI S., 1966. — Sedimentary structures resulting from convection like pattern of motion. *Annales de la Société Géologique de Pologne*, T. 36, p. 3-21.
- EDELMAN C. H., FLORSCHÜTZ F. en JESWIET J., 1936. — Über spätpleistozäne und frühholozäne kryoturbate Ablagerungen in den östlichen Niederlanden. *Verh. geol.-mijnb. Genoot. Ned. Kolon.*, 's-Gravenhague, T. 11, p. 301-336.
- GLINKA K., 1914. — Die Typen der Bodenbildung, ihre Klassifikation und geographische Verbreitung. Gebrüder Borntraeger, Berlin, 365 p.
- GODARD A. et HOUËL-GANGLOFF F., 1965. — Essais de gélifraction artificielle pratiqués sur des calcaires et des grès lorrains. *Revue Geogr. de l'Est*, n° 2, p. 125-139.
- GRIPP K., 1926. — Über Frost und Strukturboden auf Spitzbergen. *Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin*, p. 351-354, Berlin.
- GRIPP K., 1927. — Beiträge zur Geologie von Spitzbergen. *Abhandl. der Naturwissenschaft. Vereins zu Hamburg*, t. XXI, Hamburg.
- HOLMES G. W., HOPKINS D. M. and FOSTER H. L., 1963. — Pingos in central Alaska. *Geol. Soc. Amer.*, Spec. paper 73.
- HOLMQUIST P. J., 1897. — Über Mechanische Störungen und Chemische Umsetzungen in dem Banderthon Schwedens. *Bull. Geol. Inst. Uppsala*, Vol. 3, n° 12.
- HOPKINS D. M. and SIGAFOOS R. S., 1951. — Frost action and vegetation patterns on Seward Peninsula, Alaska. *U. S. Geol. Survey Bull.* 974 C, p. 51-101, 31 fig., Washington.
- HOPKINS D. M. and SIGAFOOS R. S., 1954. — Role of frost thrusting in the formation of tussocks. *Am. Journ. Sci.*, V. 252, p. 55-59.
- HOPKINS D. M., KARLSTROM T. N. V. and others, 1955. — Permafrost and ground water in Alaska. *Geol. Survey*. Prof. paper 264 F, p. 113-146.

- JAHN A., 1956. — Some periglacial problems in Poland. *Biuletyn Peryglaciacyjny*, T. 4, p. 169-183.
- JAHN A., 1964. — Some new experimental attempts to explain soil structures in periglacial zone. Communication présentée au Congrès de Londres; Stencilé.
- KATASONOV E. M., 1969. — Guide to trip round central Yakutia. Excursion II : The middle course of the Lena River. Frost cracks, frost fissures and related polygons International symposium « Paleogeography and periglacial phenomena of Pleistocene ». Yakutsk, July 29 - August 5, 1966.
- KOZARSKI S. et ROTNICKI K., 1964. — Involutions dans le sandr du stade de Poznan, au S. de Gniezno. *Biuletyn Peryglaciacyjny*, n° 13, p. 15-52.
- LINNEL K. A. and KAPLAR C. W., 1956. — The factors of soil and material type in frost action. *Highway Research. board. Bull.* 225, p. 81-127.
- LLIBOUTRY L., 1965. — *Traité de glaciologie*. Masson, 120, bd. St-Germain, Paris VI, 1040 p.
- LOW A. R., 1925. — Instability of viscous fluid motion. *Nature*, T. 115, p. 299-300.
- MAARLEVELD G. C., 1965. — Frost mounds. A summary of the literature of the past decade. *Mededelingen van de geologische Stichting*. Nieuwe Serie, n° 17, p. 1 à 16.
- MACKAY J. R., 1962. — Pingos of the pleistocene Mackenzie delta area. *Geogr. Bull.*, n° 18, p. 21-63.
- MALAURIE J., 1968. — Thèmes de recherche géomorphologique dans le Nord-Ouest du Groenland. Mem. et Doc. du C.N.R.S., 15, quai Anatole-France, Paris VII.
- NEAL J. T., LANGER A. M., KERR P. F., 1968. — Giant dessication polygons of Great basin Playas. *Bull. Geol. Soc. of America*, V. 79, p. 69-90.
- NORDENSKJÖLD O., 1909. — *Die Polarwelt*. B. G. Teubner, 220 p., Leipzig und Berlin
- PATALEIEV A. V., 1955. — Frost fissures in grounds. *Priroda*, Moscou (cité par J. Dylik, 1966).
- PEWE T. L., 1959. — Sand wedge polygons (Tessellations) in the Mc Murdo Sound Region, Antarctica. A progress report. *Am. Journ. Sci.*, V. 257, p. 545-552.
- PEWE T. L. and PAIGE R. A., 1963. — Frost heaving of piles with an example from Fairbanks, Alaska. *Geol. Survey of U.S.A.*, Bull. 1111-I, p. 333-407.
- PEWE T. L., 1966. — Permafrost and its effect on life in the North. Oregon state University press. Corvallis, 40 p.
- PEWE T. L., 1966. — Paleoclimatic significance of fossil ice wedges. *Biuletyn Peryglaciacyjny*, n° 15, p. 65-73.
- PFUL E., 1932. — Über die Schichtenstörungen in den Unteren Sanden der Tongruben von Glindow. *Z. Geschiebeforsch.*, Berlin, T. 8, p. 21.
- PISSART A., 1964. — Contribution expérimentale à la connaissance de la genèse des sols polygonaux. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, T. 87, Bull. n° 7, p. B 213-223.
- PISSART A., 1965. — Les pingos des Hautes Fagnes. Les problèmes de leur genèse. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 88, n° 6, p. B 277-289.
- PISSART A., 1966. — Expériences et observations à propos de la genèse des sols polygonaux triés. *Rev. belge de Géogr.*, t. 90, fasc. 1, p. I à 19.
- PISSART A., 1967. — Les pingos de l'île Prince Patrick (76° N, 120° W). *Geogr. Bulletin*, V. 9, n° 3, p. 189-217.
- PISSART A. 1868. — Les polygones de fente de gel de l'île Prince Patrick (Arctique canadien, 76° Lat. N.). *Biuletyn Peryglaciacyjny*, n° 17, p. 171-180.
- PISSART A., 1969. — Le mécanisme périglaciaire dressant les peirres dans le sol. Résultats d'expériences. *C. R. Acad. Sc. Paris*, t. 268, p. 3015-3017.
- RAUP H. M., 1963. — Turf hummocks in the mesters vig district, Northeast Greenland. Proceedings permafrost international conference, 11-15 novembre 63. *Nat. Acad. Sc., Nat. Res. Council*, publication n° 1287. Washington, p. 43-50.

- SCHOUMSKY P. A., 1955. — Principes de glaciologie structurale. Traduction de J. Pietreson de Saint Aubin et A. Bauer. *Annales Centre Études et Documentation paléontologiques*, n° 22, octobre 57, 309 p.
- SHARP R. P., 1942. — Periglacial involutions in north-eastern Illinois. *Journ. Geology*, V. 50, p. 113-133.
- SHARP R. P., 1942. — Soil structures in the St Elias Range, Yukon territory. *Journ. Geom.*, V. 5, p. 274-301.
- SIUTA I., 1962. — On the origin of some lithological soil deformations. *Przegled Geograficzny*, t. 34.
- STEEGER W., 1929. — Fossilführende schichten der Sog. Krefelder Mittelterrasse. *Ber. Niederrhein Geol. Ver.*, 1929.
- SVENSSON H., 1965. — Structural observations in the minerogenic core of a pals. *Sårtryck fran Lunds Universitets Geografiska Institution*, n° 17, p. 137-142.
- SVENSSON H., 1967. — Jordskalven vid Hallandsasen I Februari 1966. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*. Vol. 89, p. 151-180.
- TABER S., 1929. — Frost Heaving. *Journal of Geology*, V. 37, n° 5, p. 428-461.
- TABER S., 1930. — Freezing and thawing of soils as factors in the destruction of road pavements. *Public roads*, V. II, n° 6, p. 113-132.
- TABER S., 1930. — The mechanics of frost heaving. *Journal of Geology*, V. 38, n° 4, p. 303-317.
- TABER S., 1943. — Perennially frozen ground in Alaska; its origin and history. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, V. 54.
- TRICART J., 1956. — Étude expérimentale de la gélivation. *Biuletyn Peryglacjalny*, n° 4, p. 285-318.
- TRICART J. et CAILLEUX A., 1967. — Le modélé des régions périglaciaires. S.E.D.E.S., 5, place de la Sorbonne, Paris, 412 p.
- VAN LECKWIJCK W. et MACAR P., 1949. — Phénomènes pseudo-tectoniques, la plupart d'origine périglaciaire, dans les dépôts graveleux dit « ONX » et les terrasses fluviales de la région liégeoise. *Ann. Soc. Geol. Belg.*, t. 73, p. m 3-78, Liège.
- WASHBURN A. L., 1947. — Reconnaissance geology of portions of Victoria Island and adjacent regions. Arctic. Canada. *Geol. Soc. of America*. Mem. 22, 133 p.
- WASHBURN A. L., 1950. — Patterned ground. *Revue Canad. Geogr.*, 4, 5-59.
- WASHBURN A. L., 1956. — Classification of patterned grounds and review of suggested origins. *Bull. Geol. Soc. America*, V. 67, p. 823-866.
- WASHBURN A. L., D. D. SMITH and R. H. GODARD, 1963. — Frost cracking in a middle latitude climate. *Biuletyn Peryglacjalny*, n° 12, p. 175-189.
- WATSON E., 1965. — Periglacial structures in the Aberystwyth region of Central Wales. *Proceedings of the geologists' association*, V. 76, part 4, p. 443-462.
- WESTGATE J. A. and L. A. BAYROCK, 1964. — Periglacial structures in the Saskatchewan gravels and sands of central Alberta, Canada. *Journ. Geology*, V. 72, p. 641-648.

