

## L'ORIGINE DES CRYOTURBATIONS

A. PISSART (\*)

### Abstract

*In this article different hypotheses with regard to the origin of cryoturbations are discussed.*

*The load-casting hypothesis seems to be unable to explain certain dropstructures due to cryoturbations. Furthermore it has not been shown that the frost/thaw cycle does liquify sufficiently the soil to enable density movements.*

*It is argued that the cryostatic pressure resulting from the nature of permafrost and actif layer does not account for the periglacial involutions as observed in outcrops. Experiments showed that uneaqual swelling of materials of different nature due to freezing leads to deformations such as the sinking of finer particles within the courser material. This explains to a large extend the observed cryoturbations.*

### INTRODUCTION

Dans l'un des premiers articles qu'il a publié, L. PEETERS a, en 1944, décrit des cryoturbations. C'était un des premiers travaux qui dans notre pays interprétait ces structures comme d'origine périglaciaire. De ce fait, il nous a paru heureux, dans cet article écrit en son honneur, de nous pencher sur l'origine de ces formes et de discuter des différentes hypothèses génétiques qui se trouvent aujourd'hui en présence. Comme les publications se rapportant à ces structures sont extrêmement nombreuses, il ne sera pas possible ici de mentionner tous les travaux qui sont consacrés aux "involutions périglaciaires". Nous nous efforcerons toutefois de mentionner toutes les explications qui ont été proposées pour rendre compte de ces déformations.

### *Nomenclature, définition, les premières descriptions*

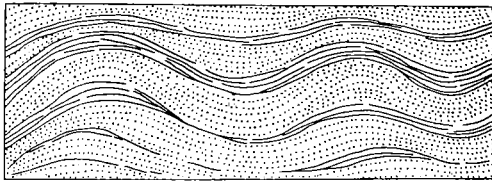
Le terme *cryoturbations* a été utilisé la première fois par EDELMAN et al. en 1936. Il possède plusieurs synonymes tels que "*periglacial involutions*" que SHARP (1942) utilise, *congeliturbation* employé par

(\*) Université de l'Etat, Liège

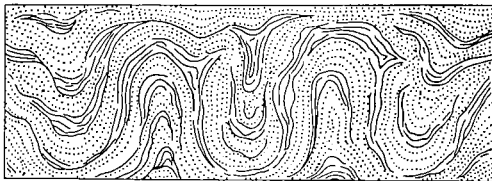
BRYAN (1946) et *géliturbation* proposé par HAMELIN et COOK (1967) en français. Les termes *involutions*, *turbations*, *convolutions* ou *contortions* employés quelquefois sont purement descriptifs et n'indiquent pas que les déformations sont liées au gel.

Nous retiendrons la définition donnée par SHARP (1942) "aimless deformation, distribution and interpenetration of beds produced by frost action". Nous n'englobons donc pas sous le terme de cryoturbation toutes les modifications dues au gel de la disposition des couches comme le font HAMELIN et COOK (1967) ou DERRUAU (1974) puisque nous en excluons par exemple les structures dues aux fentes de gel qui présentent un aspect caractéristique bien connu et dont l'origine est tout à fait différente.

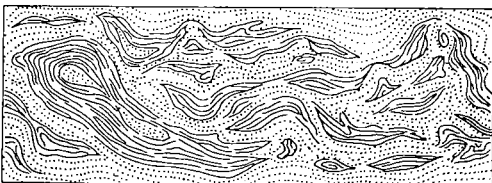
Au sein de ces déformations, A. JAHN (1956) distingue (fig. 1) les plications qui sont de simples ondulations, les involutions en piliers qui comportent des plis plus importants avec interruption des couches et les involutions amorphes qui brouillent complètement la structure originelle.



A



B



C

fig. 1  
Différents types de cryoturbation selon A. JAHN (1956).  
A. Plications;  
B. Involution en piliers;  
C. Involution amorphes.

Les gouttes (droplike forms) décrites par différents auteurs, et notamment par VAN GELEN (1943), STEUSLOFF (1952), GULLENTOPS et PAULISSEN (1978), HEYSE (1983), constituent des poches de matériaux descendus dans les formations sous-jacentes. Toutes les transitions existent entre de simples ondulations des couches et les "gouttes" qui, détachées de la couche d'où elles proviennent, sont suspendues dans les sables. A l'inverse des structures en gouttes, il existe aussi des structures en "bulles" et en "ballonnets" (DYLIKOWA, 1961), poches de sable montées au milieu des argiles jusqu'à n'avoir plus aucun lien avec la couche dont elles proviennent.

Ces déformations des couches ont attiré l'attention des chercheurs bien avant que des hypothèses génétiques aient été proposées pour en rendre compte. Aussi, lorsque EDELMAN et TAVERNIER ont interprété en 1940, pour la première fois en Belgique, ces formes comme d'origine périglaciaires, ils ont signalé divers chercheurs qui les avaient décrites auparavant (COGELS et VAN ERTBORN, 1883; RUTOT, 1899; HALLEZ, 1914). Par la suite, l'intérêt pour ces formes s'est accru et les descriptions se sont multipliées au point qu'il est impensable de vouloir toutes les rapporter dans cet article. Mentionnons toutefois qu'une liste des premiers travaux effectués dans notre pays sur ce sujet a été publiée par PISSART (1976).

#### *Les hypothèses génétiques*

Il est souvent difficile de démontrer l'origine périglaciaire des cryoturbations ainsi que A.L. WASHBURN (1973) l'a souligné. Toutefois, dans certains cas, l'association de ces déformations avec des fentes de gel (VANDENBERGHE et VAN DEN BROECK, 1982) et aussi leur contexte stratigraphique ne laissent guère planer de doute quant aux conditions d'apparition de ces structures dans un environnement froid.

Deux explications différentes ont été proposées pour rendre compte de ces structures, à savoir: 1) des mouvements au sein de sédiments meubles saturés d'eau et déterminés par une différence de densité (hypothèse "load cast"); 2) des déplacements apparus suite à des pressions nées au moment du gel (hypothèse cryostatique). Nous considérerons successivement chacune de ces hypothèses en soulignant les éléments favorables ou défavorables à chacune d'entre elles.

## 1. HYPOTHESE DE "LOAD CAST"

WASHBURN (1973, 1979) cite les nombreux auteurs qui ont observé la similitude entre des déformations qui apparaissent dans des matériaux meubles, saturés en eau, et les cryoturbations périglaciaires. Ils ont défendu l'idée que les cryoturbations pourraient être nées de la même manière, c'est-à-dire suite à des différences de densités apparues dans les sédiments gorgés d'eau: les sédiments les plus denses seraient descendus dans des formations plus légères sous-jacentes (voir par exemple BUTRYM et al, 1964).

L'existence de telles "load deformations" est bien connue dans des formations géologiques diverses et ont été décrites sous les noms de "flow casts" (SHROCK, 1948), "load casts" (KUENEN, 1953), "load folds" and "load pockets" (SULLWOLD, 1959). P. MACAR (1958) dans un article intitulé "les déformations pénécontemporaines de la sédimentation" avait souligné que ces structures apparaissent généralement peu après le dépôt des couches. Il s'était intéressé particulièrement à des structures de ce type, qu'il avait observées dans le Famennien et dénommées "pseudo-nodules" (MACAR, 1948). L'existence de telles déformations des couches sous l'action de différence de densité n'est donc pas douteuse. Elles ont été observées dans la nature ancienne, dans des dépôts très récents (MACAR, 1958), et ont aussi été réalisées expérimentalement (KUENEN, 1958; DZULINSKI and WALTON, 1963; BUTRYM et al., 1964; ANKETELL et al., 1969, 1970).

Pour les auteurs qui admettent que les cryoturbations naissent de cette manière (à l'exception de GULLENTOPS et PAULISSEN, 1978, dont nous parlerons plus loin), le rôle du gel est indirect; il provoque au dégel une sursaturation en eau du sol qui permet l'apparition de ces "load deformations" (WASHBURN, 1973). La formation de glace de ségrégation, en amenant des quantités d'eau très importantes en certains endroits, serait à l'origine de la liquéfaction du sol. L'imperméabilisation du sol en profondeur par le pergélisol ou par le sol gelé aurait joué un rôle très favorable à l'apparition de ces structures (HEYSE, 1984).

### *Discussion de cette hypothèse*

Signalons que les expériences donnant des "loadcasts" ont toutes été réalisées en sédimentant sous eau des couches de matériaux légers puis plus denses (par exemple des argiles puis des sables) et que, à notre connaissance, jamais le déclenchement du phénomène n'a été obtenu suite à des alternances de gel et de dégel. Or, dans les nombreuses expériences que nous avons effectuées en laboratoire, le sol limoneux ou argileux ne se présente pas au dégel comme une masse boueuse mais comme une accumulation de polyèdres très cohérents (LAUTRIDOU et al., 1984). Ces polyèdres, qui ont été formés entre les lentilles de glace de ségrégation, ont été comprimés par la croissance de celles-ci et par les phénomènes de cryosuccion qu'ils ont subis. Cette structuration du sol par le gel est maintenant bien connue et étudiée par de nombreux auteurs (VAN VLIET-LANOE, 1976, 1982). Les polyèdres restent remarquablement stables au point que cette structure est fréquemment retrouvée en profondeur et témoigne de gels qui se sont produits pendant les périodes froides du Quaternaire. Etudiant cette microstructure dans des sols cryoturbés, LAUTRIDOU et al. (1984, p. 16) la retrouvent dans tous les matériaux qu'ils examinent et en tirent la conclusion qu'il n'y a pas eu de liquéfaction de ces sédiments au dégel.

Plusieurs étés passés dans l'Arctique canadien nous ont convaincus que l'expression de "mollisol", malheureusement très largement utilisée en français comme équivalent de "couche active", donne une vue tout à fait erronée de la consistance du sol dans les régions périglaciaires. Ce n'est que très localement, dans le temps comme dans l'espace, que le sol prend une consistance boueuse. Aussi, il ne nous paraît pas du tout évident que dans des sédiments silteux et argileux, l'alternance gel-dégel entraîne l'apparition d'un état favorable à l'apparition de "load-casts".

Et cependant, l'existence local de sédiments sursaturés dans la couche active a été démontrée par des témoignages rapportés par WASHBURN (1979, p. 98) et par FRENCH (1976, p. 43). Ces auteurs ont rapporté que l'expulsion de matériaux boueux sortant du sol et formant des "non sorted circles" avait été observée, suite à de

faibles secousses comme celles dues au passage d'un piéton ou d'un véhicule léger. Ces observations sont cependant exceptionnelles et insuffisantes pour établir définitivement l'hypothèse "load-cast". Pour progresser dans cette voie, il faudrait mieux connaître les conditions qui permettent au sol de devenir entièrement boueux. Pour notre part, nous n'en connaissons actuellement qu'une seule, à savoir un assèchement complet suivi d'une rehydratation, phénomène qui ne nous paraît guère pouvoir se produire dans un sol soumis au gel.

Dans l'ignorance où nous sommes des conditions de liquéfaction des sols au dégel, on pourrait sans doute admettre que, localement, des "load casts" induits par le gel existent véritablement. Toutefois, cette hypothèse ne peut rendre compte de toutes les cryoturbations connues. Les structures en "gouttes" de HEYSE (1984) et DE MOOR (1984) par exemple (décrites par de nombreux auteurs sous des noms divers: "droptails", "dropstructures" and "spherical structures") sont des poches de limon, de marne, de tourbe argileuse et même de tourbe, descendues dans les sables de couverture bien triés (figure 2). Dans ces cas bien précis, l'hypothèse "load-cast" est impossible à admettre car la densité de la tourbe par exemple restera toujours inférieure à celle de l'argile. Les pseudo-nodules typiques du Famennien décrits par P. MACAR résultent toujours d'une descente des sables dans de l'argile et jamais l'inverse n'a été décrit. Or, nous verrons plus loin que ce type de mouvement, à savoir la descente de matériaux fins dans des sédiments plus grossiers, est, par contre, facilement expliquée par des actions de pression cryostatique.

Ajoutons encore que certaines déformations observées dans des phénomènes périglaciaires comme les thufurs ou comme la déformation de couches au centre des polygones de petite taille (PISSART, 1982) ne peuvent résulter d'action de "load casts". Il y a donc d'autres processus que les déplacements par densité qui sont susceptibles d'engendrer la déformation des couches en milieu périglaciaire.

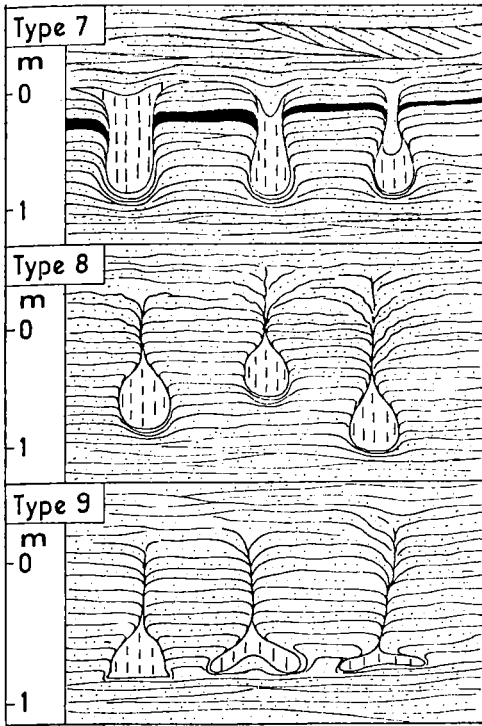


fig. 2  
Structures en "gouttes" d'après I. HEYSE (1983). Type 7: drop-tails; type 8: drop-structures and spherical structures; type 9: clock structures and boomerang structures.

## 2. HYPOTHESE DE PRESSION CRYOSTATIQUE

Peu d'expériences ont démontré jusqu'à présent l'existence d'une déformation des couches sous l'action directe des alternances gel/dégel (CORTE et HIGASHI, 1972; COUTARD et MUCHER, 1985). Aussi, si l'hypothèse d'une déformation sous l'action de la pression, que peut développer l'eau qui gèle, a été considérée comme probable dès le début de l'étude des cryoturbations (SHARP, 1942), elle n'est pas encore unanimement reçue. Quand on connaît les pressions extraordinairement élevées qui peuvent apparaître suite à la transformation d'eau en glace, on comprend que pour beaucoup d'auteurs ce facteur ait paru être à l'origine des cryoturbations. Les démonstrations expérimentales de formation des "load casts" et les descriptions nombreuses dans des formations géologiques anciennes et récentes de phénomènes de ce type ont donné beaucoup de

crédit à la théorie de mouvements dus à de simples différences de densité. Comme nous venons de le voir, cette théorie est toutefois inadéquate pour rendre compte d'un certain nombre d'observations, et pour celles-ci il nous paraît évident qu'un autre processus intervient, à savoir la pression cryostatique.

Nous considérerons successivement ci-dessous les différentes hypothèses qui ont été avancées pour expliquer comment les pressions cryostatiques pourraient engendrer les cryoturbations. Ces hypothèses, dont l'historique est donné dans WASHBURN (1979), sont les suivantes:

- a) la pression cryostatique en engendrant la liquéfaction des sables permettrait le développement de "load casts";
- b) la pression cryostatique apparaîtrait en système fermé au moment du regel:
  1. lorsque la couche active et le pergélisol se souderaient,
  2. par congélation de matériaux fins gelant après les sédiments qui les entourent;
- c) le gonflement inégal au gel de matériaux de nature différente sans création d'une enceinte fermée.

#### *2.1. La pression cryostatique en engendrant la liquéfaction des sables permettrait le développement de "load casts".*

Le gel de sables saturés d'eau détermine l'apparition d'une pression cryostatique dont la manifestation la mieux connue est l'apparition de pingos du type Mackenzie. Il est judicieux de se demander si cette mise sous pression de l'eau intersticielle, puisqu'elle est capable de soulever le sol (MACKAY, 1979), ne peut pas, en écartant les grains sableux, réduire ainsi la résistance en déplacement et entraîner une liquéfaction. Celle-ci permettrait alors l'apparition de mouvements dus à des différences de densité. Contrairement à l'hypothèse classique des "load casts" qui se font au dégel, au moment d'une sursaturation due à la fonte de lentilles de glaces,



c'est au moment du gel que les mouvements apparaîtraient. Il faut évidemment, pour qu'une telle liquéfaction se produise, que l'eau ne puisse ni s'échapper, ni se concentrer localement sous forme de lentilles de glace de ségrégation. Cette hypothèse, qui combinerait donc, "load cast" et pression cryostatique, a été défendue par GULLENTOPS et PAULISSEN (1978) qui ont décrit soigneusement et étudié des structures du type "drop soil" avec la descente de sable limoneux au milieu de graviers de terrasses (fig. 2, type 7-8-9). Ils ont pensé que ainsi, au moment du gel, pouvait apparaître une liquéfaction suffisante des matériaux, sans laquelle n'aurait pu se produire de mouvement du type "load cast". Ils ont proposé le terme de "periglacial load casting" pour ce processus, terme qui ne devrait être retenu que si l'on admet que des "load casts" ne peuvent apparaître au dégel par une simple sursaturation due à la fonte de la glace. A ce jour, aucune preuve expérimentale de la réalité du mécanisme n'a été donnée.

Ayant mesuré et calculé la densité des différents sédiments affectés par ces structures, GULLENTOPS et PAULISSEN (1978) n'ont trouvé que de très faibles différences à l'endroit de leurs mesures. WASHBURN (1979) a souligné combien il était malaisé d'accepter l'hypothèse "load cast" dans ce cas. Aussi, comme nous le verrons ci-dessous en présentant le résultat d'expériences, il est plus facile d'admettre pour ces "drop soils" l'action directe de pressions dues au gel.

FINN et al. (1978) soulignent d'autre part que la liquéfaction des sédiments pris entre la couche active et le pergélisol peut se produire facilement dans des sédiments grossiers saturés à l'occasion de secousses sismiques. Suite au tremblement de terre de l'Alaska en 1964, des débris de charbon, des graviers, des cendres et d'autres matériaux sont remontés à la surface depuis des profondeurs de 6 à 7,5 m, en suivant des fissures apparues dans le sol gelé. De tels phénomènes sont donc susceptibles d'expliquer certaines déformations des couches.

2.2. La pression cryostatique apparaissant en système fermé au moment où la couche active se souderait au pergélisol.

Cette hypothèse clairement expliquée par SHARP (1942), défendue aussi par POSER (1948), permet d'expliquer l'apparition de fortes pressions dans des poches fermées apparues entre la couche active et le pergélisol. L'eau enfermée dans ces poches, pour autant que le sol soit saturé, entraînerait en gelant la déformation des couches encaissantes.

Il a été démontré expérimentalement que le gel en système fermé engendre des déformations dans des couches saturées (PISSART, 1966). En effet, nous avons fait geler depuis le sommet et les parois un récipient circulaire contenant des couches colorées de limon éolien. Après 17 alternances gel/dégel, la surface du limon remplissant le récipient était nettement bombée et les couches internes présentaient d'importantes déformations (fig. 3).

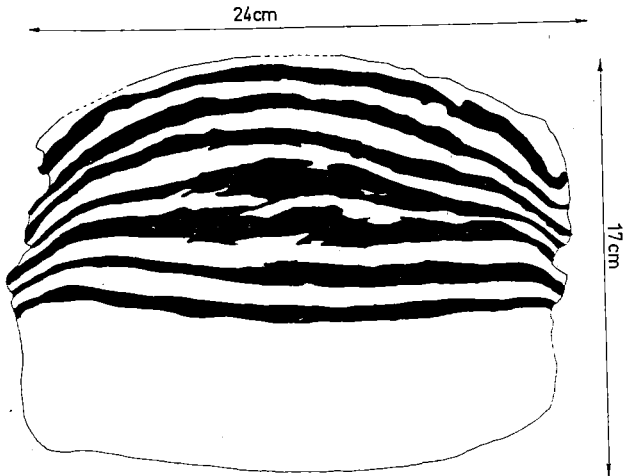


fig. 3 Déformations de couches de limon colorées et non colorées disposées horizontalement et ayant subi 17 gels à  $-5^{\circ}\text{C}$  pendant 24 h. Le gel a pénétré non seulement depuis la surface mais aussi depuis les côtes du récipient (PISSART, 1966).

L'explication de celles-ci sont claires: le gel progressant de la surface et de tous les côtés du récipient a créé une masse rigide (adhérant d'ailleurs aux parois) ne permettant pas un simple soulèvement de la surface parallèlement à elle-même sous l'action du gel. Une pression cryostatique s'est de la sorte développée au milieu du récipient et cette pression a déformé la couche superficielle gelée en provoquant le déplacement vers le centre des limons subissant la pression.

Ces conditions expérimentales s'écartent évidemment beaucoup des conditions naturelles existant lors du gel du sol, mais l'expérience illustre clairement le mécanisme de la pression cryostatique et démontre comment elle peut engendrer le déplacement des sédiments: le gel détermine l'apparition d'une pression dans le sol, pression qui se relâche en direction de la zone de moindre résistance, par déformation des matériaux encaissants.

Cette théorie rend aisément compte de l'existence de déformations situées à proximité de la partie supérieure du pergélisol. Elle expliquerait aussi les déformations apparues à ce niveau dans des matériaux de composition homogène. Pour apparaître, ce phénomène demande seulement que la soudure couche active/pergélisol ne se produise pas partout en même temps, c'est-à-dire que le gel ne pénètre pas uniformément dans le sol. Précisons à ce sujet que, si des différences de nature peuvent bien expliquer des différences de vitesse de pénétration du gel, ce n'est pas cependant la seule cause possible. La répartition inégale de la neige en surface, des différences dans la couverture végétale, ... peuvent aussi justifier le même phénomène.

Toutefois, les cryoturbations affectent essentiellement des formations de composition différente et ne paraissent pas liées à un niveau déterminé qui représenterait le sommet du pergélisol. Au contraire, d'après la majorité des auteurs, la forme aplatie de la partie inférieure des cryoturbations témoigne du niveau où se trouvait le pergélisol. PISSART (1976) a d'autre part décrit sur l'île de Banks des cryoturbations typiques qui sont localisées loin du sommet du pergélisol.

2.2.2. *La pression cryostatique apparaissant en système fermé suite aux différences de température de congélation de l'eau comprise dans des matériaux de nature différente.*

Indépendamment de l'existence d'un pergélisol, des systèmes fermés, comparables à celui que nous venons d'évoquer, apparaissent naturellement au sein d'un sol composés de matériaux différents. En effet, comme le notait DYLIKOWA (1961, p. 10) à propos du même problème de l'origine des cryoturbations, une partie importante de l'eau tenue dans les sols fins se congèle à une température inférieure à 0°C. Aussi l'eau comprise dans une poche d'argile située au milieu de sables cimentés par la glace n'est pas gelée à -1°C. Elle augmentera donc de volume lorsque, la température s'abaissant, l'eau que contient cette argile se transforme en glace. Ainsi peut donc se former une enceinte fermée non ou partiellement gelée, comprise au milieu de sédiments plus grossiers gelés, où la pression augmente lorsque la température s'abaisse, au point de provoquer une déformation du sol qui permet le relâchement de cette pression. Cette déformation se fait à l'endroit où la déformation est la plus faible, ce qui peut être, selon les circonstances, aussi bien vers la surface que vers le bas. Il est évident que chaque gel ne donne qu'une très faible déformation, mais comme les mêmes conditions se reproduisent à chaque gel, les déformations se réalisent toujours dans la même direction et s'amplifient progressivement. DYLIKOWA (1961) et nous-même (PISSART, 1976) avons défendu cette hypothèse qui explique que les cryoturbations ne nécessitent pas pour apparaître l'existence d'un pergélisol.

2.3. *Le gonflement inégal lors du gel de matériaux de granulométrie différente sans formation d'une enceinte fermée.*

Que des déformations puissent se produire suite au gonflement inégal de matériaux de nature différente (processus considéré par WASHBURN (1979) comme une cause possible) a été démontré par des expériences de laboratoire (PISSART, 1982 a et b). Nous les rappelons brièvement ci-dessous.

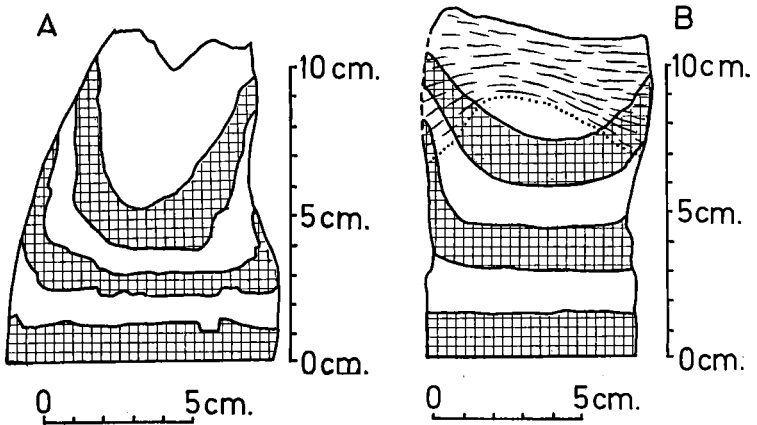
Des cylindres de limon éolien (de 73 mm de diamètre et 95 mm de

hauteur), constituées de 6 couches alternativement colorées et non colorées, ont été placés dans des bacs de bois et entourés de graviers de 5 à 10 mm de longueur. Ces bacs ont été exposés à un gel très lent depuis la surface. Après 96 heures de gel, alors que toute la masse était sous 0°C, les portes du frigo ont été ouvertes et le dégel s'est effectué en une dizaine d'heures. Après un dégel complet, le cailloutis a été complètement immergé pendant 2 jours afin de permettre une réalimentation en eau des cylindres de loess. L'eau a été soigneusement siphonnée avant de recommencer un nouveau cycle gel/dégel. Le siphonnement a été effectué plusieurs fois au cours de 4 heures de façon à assécher le mieux possible le cailloutis. Avec cette procédure, le cailloutis était complètement libre de glace pendant le gel et les cailloux n'adhéraient absolument pas les uns aux autres.

La figure 4a montre les déformations qui ont été observées sur plusieurs dizaines de cylindres en appliquant ce protocole d'expériences. Elle présente l'aspect en coupe d'un cylindre gelé et donne la localisation et l'allure des lentilles de glace de ségrégation qui sont très apparentes près de la surface. La disposition de ces lentilles atteste que le front de pénétration du gel prend dans le cylindre une forme convexe vers le haut, autrement dit, que le gel s'avance non seulement du sommet vers la partie inférieure du cylindre, mais aussi des bords vers le centre de celui-ci. L'assèchement progressif des cylindres, suite à la migration de l'eau vers la surface, explique qu'aucune lentille de glace de ségrégation n'existe à une certaine profondeur. La hauteur du cylindre dépasse de beaucoup les 95 mm initiaux suite à la dilatation due au gel.

Les contacts entre les couches de couleurs différentes montrent dans la partie supérieure du cylindre un infléchissement très net, en direction de la surface. Ce déplacement des matériaux près des bordures a provoqué un élargissement du cylindre à sa partie supérieure et une réduction de son diamètre à mihauteur. Nous pensons que cette déformation, qui a été acquise très progressivement, s'est produite au moment du dégel, suite à la retombée des cylindres retenus entre les cailloutis qui n'avaient pas été

soulevés de la même manière. Quand le bac était gelé, les cylindres de limon dépassaient en effet nettement la surface du cailloutis.



**fig. 4** Sections transversales à travers des cylindres formés de couches horizontales de limon coloré et non coloré ayant subi des alternances gel/dégel.

- A. Après 15 alternances gel/dégel au milieu d'un cailloutis saturé d'eau après le dégel et bien asséché avant le début de chaque gel.
- B. Après 19 alternances gel/dégel au milieu d'un cailloutis saturé d'eau après le dégel et imparfaitement asséché avant le début de chaque gel, de sorte que les cailloux étaient cimentés par la glace.

Des expériences en tout point semblables, sauf en ce qui concerne le drainage de l'eau comprise entre les graviers, ont déformé les cylindres d'une manière très différente. Dans ces expériences, les bacs ont été soumis au gel immédiatement après que l'eau ait été siphonnée. De ce fait, une certaine humidité persistait dans le cailloutis et, avec le gel, elle provoquait la cimentation des cailloux les uns avec les autres. Cette cimentation était telle que pour extraire les cylindres gelés, il était nécessaire d'employer un marteau pour séparer les cailloux les uns des autres.

La figure 4b montre un cylindre qui a subi 19 alternances de gel/dégel dans ces conditions. Les déformations observées consistent non seulement en un soulèvement du matériau à proximité des bordures, mais encore et surtout en un affaissement du centre des cylindres. Ce mouvement s'accompagne d'un rétrécissement de la partie supérieure du cylindre et d'un élargissement de sa partie inférieure.

Le phénomène qui a été décrit dans l'expérience précédente (à savoir le frottement du cailloutis contre les cylindres au moment où, au dégel, il s'affaisse) a sans doute joué un rôle dans la déformation que nous venons de voir. Cette influence est toutefois secondaire car les déformations principales observées ici, y compris les variations de diamètre du cylindre, résultent essentiellement de l'adhérence du cailloutis au cylindre au moment du gel et de l'adhérence entre eux des éléments du cailloutis. La masse rigide ainsi constituée n'a pas permis aux cylindres de s'élever au-dessus de la surface du gravier; aussi, sa dilatation s'est-elle traduite par un mouvement de poussée vers le bas; celle-ci provoque un déplacement du matériau dans cette direction. Ce mouvement de descente est surtout important au centre du cylindre, en raison de la forme concave vers le bas de l'onde de gel.

Afin de confirmer le mouvement de descente du limon et de démontrer que celui-ci se produit dans des matériaux plus grossier, nous avons effectué la même expérience en disposant des cylindres de limon sur du sable fluviatile. L'expérience a été réalisée dans des bacs carrés dont les parois, inclinées de 45°, ont été recouvertes de graisse (fig. 5). Cette double précaution avait pour but, en interdisant tout accrochage du matériau sur les bords du bac, de supprimer les effets de parois. L'aspect interne des cylindres a été examiné après 5, 10 et 15 cycles gel-dégel. Ces expériences ont clairement montré une descente progressive des cylindres de limon dans les sables sous-jacents, descente qui s'accroît avec le nombre de gels-dégels. L'élargissement du cylindre en profondeur résulte de la proximité du fond du bac qui limite la descente des matériaux (fig. 5). La déformation est à ce niveau, identique à celle qui se produit au contact du pergélisol et qui donne à la base des

cryoturbations une forme aplatie.

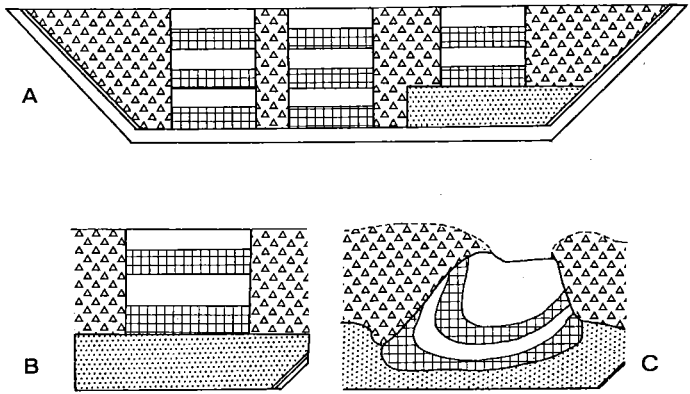


fig. 5 A. Coupe a travers un bac carré de 65 cm de côté au sommet, montrant le dispositif expérimental avant l'expérience  
B. Vue du cylindre de limon de 73 mm de diamètre et reposant sur du sable grossier, avant le gel.  
C. Coupe au travers du même cylindre après 15 cycles gel/dégel, montrant la descente du limon dans les sables et ressemblant à une "clockstructure" telle que la montre notre figure 2 (type 9 de HEYSE, 1984).

La pression cryostatique responsable de la déformation ne s'exerce pas ici dans une enceinte fermée. Dans ce cas, la pression est limitée par le poids des formations sous-jacentes. La pression disparaît au moment où les terres surincombantes se soulèvent. Dans le cas où les terres superficielles sont cimentées par le gel, le soulèvement peut engendrer toutefois des pressions locales importantes et cela lorsque la surface où s'exerce la pression est réduite par rapport à la surface de la zone soulevée (principe de la presse hydraulique).

Ces expériences démontrent l'existence de déformations sous l'action du gel, sans passage à un état liquide permettant le développement de mouvements dus à des différences de densité. L'étude des microstructures dues au gel a permis à LAUTRIDOU et al. (1984) de montrer directement qu'il n'y a pas eu de liquéfaction dans des



cryoturbations décrites au Spitzberg et en Belgique.

Cette explication des cryoturbations rend compte parfaitement de ce que ces structures sont uniquement distribuées dans des sédiments de nature différente (SHARP, 1942; VAN LECKWIJK, 1949). Elle explique sans difficulté tous les types de mouvement et spécialement la descente de matériaux argileux ou tourbeux dans des sables, phénomènes de "drop soil" souvent décrits et dont les "load casts" ne peuvent rendre compte, comme nous l'avons vu précédemment. Elle justifie la forme aplatie des cryoturbations au sommet du pergélisol, comme l'ont proposé de très nombreux chercheurs. Soulignons enfin que ce mécanisme, dont les fondements physiques sont bien établis par les expériences que nous avons rapportées, se produit lors du gel du sol, sans qu'il soit nécessaire qu'existe un pergélisol. Seules les cryoturbations dont les extrémités inférieures sont aplanies témoignent de l'existence d'un niveau toujours gelé au moment de la pénétration du gel.

LAUTRIDOU et al. (1984) dans un article récent défendent une opinion semblable. Ils insistent toutefois sur le rôle de fissures de dessiccation ou de retrait thermique comme directeurs de certains mouvements et soulignent toute l'importance de la proximité de la nappe phréatique.

C'est donc ainsi le gonflement différent des matériaux lors du gel qui est, dans cette hypothèse, la cause première des déformations. S'il est aisé de comprendre comment les déformations amorcées se développent, il est plus difficile de démontrer comment et pourquoi les premières déformations apparaissent.

#### CONCLUSION

Les hypothèses "load cast" et "pression cyrostatique" sont les deux explications qui ont été proposées pour rendre compte des cryoturbations. Il a été démontré expérimentalement que les deux mécanismes engendrent effectivement la déformation de couches de matériaux meubles.

Il n'a pas été prouvé que des mouvements par densité pouvaient apparaître suite à des alternances de gel et de dégel, et il est d'autre part évident que certains sols à gouttes (drop soil) ne peuvent être nés de cette manière. Par contre, la déformation des couches par gonflement différentiel au moment du gel, c'est-à-dire par pression cryostatique, est démontrée expérimentalement et rend compte de tous les types de mouvement observés. Cette hypothèse explique pourquoi les cryoturbations existent uniquement dans des matériaux de granulométrie différente et généralement dans des zones très humides. Ce mécanisme de gonflement différentiel jouerait un rôle essentiel dans la formation de nombreux sols périglaciaires, tels les thufurs, etc.

Selon cette hypothèse, les cryoturbations ne témoignent pas de l'existence d'un pergélisol ainsi que KAISER (1960), WRIGHT (1961) et BLACK (1969) l'avaient déjà souligné, mais seulement de la zone au sein de laquelle le sol a subi des alternances gel/dégel.

#### BIBLIOGRAPHIE

ANKETELL, J.M., CEGLA, J., DZULINSKI, St. (1969): *Unconformable surfaces formed in the absence of current erosion.* - *Geologica Romana*, VIII, 41-46.

ANKETELL, J.M., CEGLA, J., DZULINSKI, St. (1970): *On the deformational structures in systems with reversed density gradients.* - *Ann. Soc. Géol. Pologne*, 40, 1, 3-30.

BLACK, R.F. (1969): *Climatically significant fossil periglacial phenomena in northcentral United States.* - *Biul. Perygl.*, 20, 225-238.

BRYAN, K. (1946): *Cryopedology. The study of frozen ground and intensive frost action with suggestions on nomenclature.* - *Am. J. Sci.*, 244, 622-642.

BUTRYM, J., CEGLA, J., DZULYNSKI, S., NAKONIECZNY, S. (1964): *New interpretation of "periglacial structures".* - *Polska Akademia Nauk. Oddzial W Krakowie, Folia Quaternaria*, 34.

COGELS, P. & VAN ERTBORN, O. (1883): *De l'âge des couches d'argile quaternaire de la Campine.* - *Ann. Soc. Roy. Malacol. Belg.*, 17, 210-221.

CORTE, A.E. & HIGASHI, A. (1972): Growth and development of perturbation on the soil surface due to the repetition of freezing and thawing. - Bull. Centre Geomorph. Caen, 13-14-15, 117-129.

COUTARD, J.P. & MUCHER, H. (1985): Deformation of laminated silt loam due to repeated freezing and thawing. - Earth Surface Processes and Landforms. A l'impression.

DE MOOR, G. (1983): Cryogenic structures in the Weichselian of northern Belgium and their significance. - Polarforschung, 53, 2, 79-86.

DERRUAU, M. (1974): Précis de géomorphologie. - Masson et Cie, Editeurs, 453.

DYLIKOWA, A. (1961): Structures de pression congelisatative et structures de gonflement par le gel de Katarzynow près de Lodz. - Bull. Soc. Sciences et Lettres de Lodz, 12, 9, 1-23.

DZULYNSKI, St. & WALTON, E.K. (1963): Experimental production of sole marking. - Trans. Edimb. Geol. Sc., 19, 279-305.

EDELMAN, C.H., FLORSCHUTZ, C.H.F. & JESWIET, J. (1936): Ueber spätpleistozäne und frühholozäne kryoturbbate Ablagerungen in den oestlichen Niederlanden. - Verh. Geol. Mijnb. Gen. Geol. Ser., 11, 301-336.

EDELMAN, C.H. & TAVERNIER, R. (1940): Periglaciale verschijnselen, meer in het bijzonder in de Antwerpse Kempen. - Natuurwetenschappelijk Tijdschrift, 22, 139-151.

FINN, W.D.L., Yong, R.N. & LEE, K.W. (1978): Liquefaction of thawed layers in frozen soils. - J. Geotechn. Engin. Divis. Proc. Amer. Soc. Civil Engin., 104GT10, 1243-1255.

FRENCH, H.M. (1976): The periglacial environment. - Longman, London, 309.

GULENTOPS, F. & PAULISSEN, E. (1978): The drop soil of the Etsden type. - Biul. Perygl., 27, 105-114.

HALLEZ, H. (1914): Deuxième note sur les limons supérieurs de la vallée de la Haine. - Bull. Soc. belge Géol., 28, 67-76.

HAMELIN, L.E. & COOK, F.A. (1967): Le périglaciaire par l'image. Illustrated glossary of periglacial phenomena. - Travaux et Documents du Centre d'Etudes nordiques, 4, Presses de l'Université Laval, 237.

HEYSE, I. (1983): Fossil cryoturbation types in eolian wurm late glacial sediments in Flanders (Belgium). - Polarforschung, 53, 2.

JAHN, A. (1956): Some periglacial problems in Poland. - Biul. Perygl., 4, 169-183.

KAISER, K. (1960): Klimazeugen des periglazialen Dauerfrostbodens in Mittel- und West-Europa. - *Eiszeit. und Gegenw.*, 11, 121-141.

KUENEN, Ph. H. (1958): Experiments in Geology. - *Trans. Geol. Soc. Glasgow*, 23, 1-28.

LAUTRIDOU, J.P., OZOUF, J.C., VAN VLIET-LANOE, B. & COUTARD, J.P. (1984): A propos de deux thèmes de recherche abordés au Centre de Géomorphologie du C.N.R.S.. A) Définition de normes d'analyses physiques de roches; B) Observations à propos de la genèse de sols cryoturbés ou en gouttes par gonflement cryogénique différentiel. - *Biul. Perygl.* 30, sous presse.

MACAR, P. (1948): Les pseudo-nodules du Famennien et leur origine. - *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 72, 47-74.

MACAR, P. (1958): Les déformations péné-contemporaines de la sédimentation. - *Revue des Questions scientifiques du 20-1-58*, 33.

MACKAY, J.R. (1979): Pingos of the Tuktoyaktuk peninsula area, northwest territories. - *Géogr. phys. et Quat.*, 33, 1, 3-61.

PEETERS, L. (1944): De ondergrond der continentale duinen van Lommel. - *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift*, 26, 98-102.

PISSART, A. (1966): Expériences et observations à propos de la genèse des sols polygonaux triés. - *Rev. belge de Géogr.*, 90, 1-19.

PISSART, A. (1970): Les phénomènes physiques essentiels liés au gel, les structures périglaciaires qui en résultent et leur signification climatique. - *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 93, 1, 7-9.

PISSART, A. (1976): Sols à buttes, cercles non triés et sols striés non triés de l'île de Banks (Canada, N.W.T.). Aspect en plan, en coupe et données génétiques. - *Biul. Perygl.*, 26, 275-285.

PISSART, A. (1976): Les dépôts et la morphologie périglaciaire de la Belgique. - in: *Géomorphologie de la Belgique, Hommage au Professeur P. MACAR. Labo. de Géologie et de Géographie physique*, 115-135.

PISSART, A. (1982): Expériences de terrain et de laboratoire pour expliquer la genèse des sols polygonaux décimétriques triés. - *Studia Geomorphologica Carpatho-Balkanica*, 15, 39-47.

PISSART, A. (1982): Déformations de cylindres de limon entourés de graviers sous l'action d'alternances gel/dégel. - *Biul. Perygl.*, 29, 219-229.

POSER, H. (1948): Boden- und Klimaverhältnisse in Mittel- und Westeuropa während der Würmeiszeit. - *Erdkunde*, 2, 53-68.

RUTOT, A. (1899): Comparaison du Quaternaire de la Belgique au glaciaire de l'Europe centrale. - *Bull. Soc. belge Géol.*, 13, 307-321.

SHARP, R.P. (1942): *Periglacial involutions in northeastern Illinois*. - *J. Geol.*, 50, 113-133.

SHROCK, R.R. (1948): *Sequence in layered rocks*. - New York, Mc Graw Hill, 507.

STEUSLOFF, U. (1952): *Periglazialer "Tropfen" und Taschenboden im südlichen Münsterlande bei Haltern*. - *Geol. Jahrbuch.*, Hannover, 66, 305-312.

SULLWOLD, H.H. (1959): *Nomenclature of load deformations in turbidites*. - *Geol. Soc. Am. Bull.*, 70, 1247-1248.

TAVERNIER, R., & HACQUAERT, A. (1940): *Kryoturbate Verschijnselen in Oost-Vlaanderen*. - *Natuurwetenschappelijk Tijdschrift*, 22, 153-158.

VANDENBERGHE, J. & VAN DEN BROEK, P. (1982): *Weichselian convolution phenomena and processes in fine sediments*. - *Boreas*, 11, 299-315.

VAN GELEN, I.J. (1943): *Eiszeitliche Befunde aus Utrecht (Nederland)*. - *Geogr. en geol. mededelingen, Physiogr. - geol. reeks. Utrecht*, 17, 39.

VAN LECKWIJCK, W. & MACAR, P. (1949): *Phénomènes pseudo-tectoniques, la plupart d'origine périglaciaire, dans les dépôts sablograveleux dits "Ouv" et les terrasses fluviales de la région liégeoise*. - *Ann. Soc. Géol. Belg.*, 73, 3-78.

VAN VLIET-LANOE, B. (1976): *Traces de ségrégation de glace en lentilles associées aux sols et phénomènes périglaciaires fossiles*. - *Bul. Perygl.*, 26, 41-55.

VAN VLIET-LANOE, B. (1982): *Structures et microstructures associées à la formation de glace de ségrégation: leurs conséquences*. - *Proceedings fourth Canadian permafrost Conference, Calgary, Alberta. March 2-6-81. Conseil National des Recherches du Canada*, 116-122.

WASHBURN, A.L. (1973): *Periglacial processes and environments*. - Edward Arnold editor, London, 320.

WASHBURN, A.L. (1979): *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. - Edward Arnold editor, London, 406.

WRIGHT, H.E. (1961): *Late pleistocene climate of Europe: a review*. - *Geol. Soc. America Bull.*, 72, 933-984.