

J. P. LAUTRIDOU *, J. C. OZOUF *,
B. VAN VLIET-LANOË *, J. P. COUTARD *

Caen

A PROPOS DE DEUX THEMES DE RECHERCHE ABORDES AU CENTRE DE GEOMORPHOLOGIE DU C.N.R.S.

A. DEFINITION DE NORMES D'ANALYSES PHYSIQUES DE ROCHES B. OBSERVATIONS A PROPOS DE LA GENESE DE SOLS CRYOTURBES OU EN GOUTTES PAR GONFLEMENT CRYOGENIQUE DIFFERENTIEL

Abstract

A. We propose new standards of physical analysis of rocks to the geomorphologists, better than those defined by the building research laboratories. They fit for the porous rocks; however there is still a problem concerning the not very porous rocks.

B. This work is based on the structural and microstructural dynamic of active and fossil cryoturbated soils and on experimental reconstructions. Differential frost-heaving constitutes the basal mechanism to explain the formation of cryoturbations. Mechanism is initiated by injection of substrate into fissures. When two sediments of different frost susceptibility are superposed and if they are located in the boundary of capillary rise from a watertable, with or without permafrost, cryoturbations can develop under alternating freezing and thawing. If the vertical succession of material present a positif gradient of frost susceptibility, diapiric forms occur; if the gradient is negative, mud boils (non-sorted polygons) rise. This sketch allows to explain most of the cryoturbated forms, including drops soils.

Résumé des auteurs

A. Nous proposons des normes d'analyses physiques de roches plus adaptées aux recherches géomorphologiques que celles employées par les ingénieurs du bâtiment. Il subsiste cependant un problème pour les roches peu poreuses, ce qui nécessite de nouvelles recherches.

B. Ce travail est basé sur la dynamique structurale et microstructurale de sols cryoturbés actifs, fossiles et sur des reconstitutions expérimentales. Le gonflement cryogénique différentiel est le mécanisme essentiel de formation des cryoturbations. Le phénomène s'ébauche par une injection du substrat au niveau de fentes. Lorsque deux matériaux de gélivité différente sont superposés et, à condition qu'ils soient situés dans la frange capillaire d'une nappe phréatique, avec ou sans pergélisol, les conditions sont réunies pour obtenir, en présence d'alternances répétées de gel-dégel, des involutions. Si la succession de matériaux affectés forme un gradient de gélivité positif, des formes en diapirs apparaissent; dans le cas inverse, un ostiole peut apparaître. Ce schéma permet d'expliquer l'essentiel des formes y compris la formation de sols en gouttes.

La recherche au Centre de Géomorphologie étant centrée sur l'expérimentation nous présentons ici deux exemples de démarches liés à cette orientation.

La plus évidente consiste à effectuer, à partir d'observations faites sur le terrain en milieu actif ou fossile, des expériences ayant pour but de vérifier la validité de certaines hypothèses ou de préciser le fonctionnement de certains mécanismes. Dans le cas présent nous abordons le problème de la genèse de sols cryoturbés ou en gouttes par gonflement cryogénique différentiel.

* Centre de Géomorphologie du C.N.R.S., Caen, France.

Une autre approche consiste, préalablement à tout essai, à définir des normes d'analyse des sédiments et des roches, pour être certain de posséder des mesures correctes et pour pouvoir assurer des comparaisons entre les travaux des différents chercheurs. Le problème le plus urgent dans ce domaine est celui des roches car les géographes et géologues travaillant sur l'altération utilisent souvent des méthodes trop disparates. Nous proposons donc à tous des normes après une longue enquête et de très nombreux tests.

A. PROPOSITION DE NORMES D'ANALYSES PHYSIQUES DES ROCHES À L'AIDE DE MESURES SIMPLES (JEAN-PIERRE LAUTRIDOU et JEAN-CLAUDE OZOUF)

Depuis 1965, le laboratoire de cryoclastie du Centre de Géomorphologie du C.N.R.S. à Caen consacre une part importante de son activité à l'étude des caractéristiques physiques des roches car ce sont des données essentielles à la compréhension de leur comportement vis-à-vis du gel.

Les normes existantes ont surtout été proposées par des ingénieurs praticiens travaillant au sein d'organismes tels que:

- en France: le C.E.B.T.P. (Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics)
l'A.F.N.O.R. (Association Française de Normalisation) qui édite les Normes Françaises Homologuées
- en Belgique: le C.S.T.C. (Centre Scientifique et Technique de la Construction)
l'I.B.N. (Institut Belge de Normalisation)
Groupe de „Gélivité” des Commissions „Béton-Produits Céramiques-Maçonnerie”
- et sur le plan international, la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais des Matériaux) Commissions 6-P.A.N. (Pierres Artificielles et Naturelles) et 25-P.E.M. (Protection et Erosion des Monuments)

Ces normes qui ont été conçues, en qui concerne les matériaux naturels, pour l'étude des pierres de taille et essentiellement des pierres calcaires ne sont donc pas adaptées à tous les types de roches que nous étudions, en particulier les roches peu poreuses à pores très fins tels que les calcaires lithographiques ou cristallisés, les granites et les grès peu poreux. Nous avons donc été amenés à mettre au point et à proposer des normes répondant mieux à nos besoins dans le domaine des Sciences de la Terre (Géomorphologie, Géologie). De plus cette normalisation, pour notre discipline, s'avérerait indispensable car la dispersion des méthodes employées rendait impossible la comparaison entre les différents travaux géographiques.

Disposant au Centre de Géomorphologie à la fois d'un appareillage lourd et d'un appareillage léger (fig. 1) nous avons pu effectuer des comparaisons et établir des relations entre les résultats des différents tests, ce qui nous a permis de proposer un ensemble de normes simples, susceptibles de fournir une approche

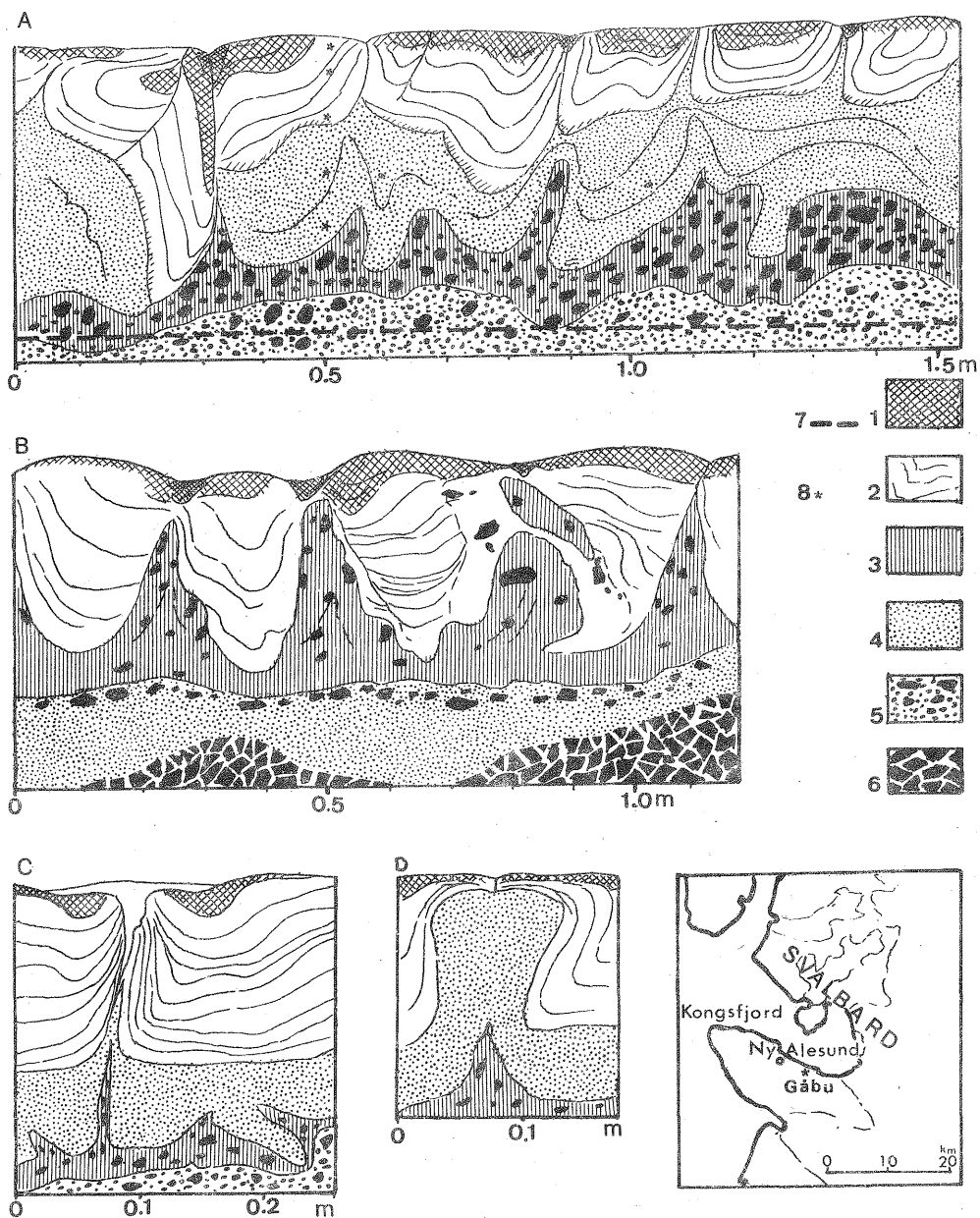


Fig. 1. Cryoturbations actives du site de Gåsbu, Spitzberg Nord Occidental

1. humus; 2. sable éolien; 3. semelle d'accumulation limoneuse; 4. sable marin grossier; 5. gravier; 6. calcaire gélifRACTÉ en place; 7. niveau de nappe; 8. sonde thermique

déjà précise des caractéristiques physiques des roches, souvent suffisante pour appréhender la plupart de nos problèmes géomorphologiques. Les méthodes proposées présentent également l'avantage de ne pas modifier ou détruire les échantillons ce qui nous permet par exemple de les soumettre ensuite à des essais de gel.

LES NORMES SIMPLES PROPOSEES

Il est nécessaire de rappeler quelques précautions à prendre lors de la préparation des échantillons.

- Noter le sens du prélèvement en cas d'extraction dans la roche en place, par exemple le sens du litage pour les calcaires.

- Sciage à la scie diamantée, brossage et passage sous l'eau pour éliminer les particules qui auraient pu boucher les pores en surface.

- Les conditions de température, d'humidité relative et de pression du local où se déroulent les mesures doivent être notées et maintenues aussi constantes que possible, non seulement pendant un essai, mais également lors d'essais différents afin de permettre des comparaisons valables entre les résultats obtenus.

- Lors de la pesée d'échantillons humides, il faut procéder à un essuyage rapide avec un chiffon ou une peau de chamois, légèrement humide, car la succion capillaire d'un tissu sec risquerait de provoquer une perte d'eau non négligeable dans le cas des roches très poreuses possédant une macroporosité importante.

- Utilisation d'eau déminéralisée.

MESURE DU POIDS SEC

Nous considérons comme sec l'échantillon pour lequel on obtient, lors de 2 pesées successives à 24 heures d'intervalle, une perte de poids inférieure à 1/1000-ème du poids obtenu lors de cette dernière pesée. La précision des pesées est au 1/10-ème de gramme et le poids pris en considération est le poids sec chaud. Le séchage s'effectue soit dans un séchoir ventilé soit dans une étuve ventilée à une température de 50°C car au-dessus il y a risque de fissuration, en particulier des marbres (TOURENQ, renseignement oral) et des granites (DURAND, 1978).

MESURE DU VOLUME APPARENT

Elle est basée sur le principe de la „poussée d'Archimède”. Pour cela nous utilisons:

- une balance à lecture numérique directe (capacité de pesée 3000 g + tarage 2500 g; précision 1/10-ème de g);

- un récipient contenant de l'eau, placé sur le plateau de cette balance. Il faut procéder à un tarage initial. Le poids de l'ensemble récipient + eau est connu;
- un dispositif permettant, grâce à une flèche mobile, d'immerger l'échantillon suspendu par un fil.

Pour connaître le volume apparent de l'échantillon il suffit de lire sur la balance l'augmentation de poids et l'on a :

$$\text{volume apparent} = \text{poids mesuré} - \text{poids du fil}$$

Quelques précautions doivent être prises :

- il faut que les échantillons soient préalablement imbibés en eau, sinon l'aspiration d'eau par un échantillon sec fausserait la mesure lors de son immersion
- il faut procéder à un nouveau tarage après chaque mesure

Cette méthode n'est pas valable dans le cas d'échantillons vacuolaires, à très gros pores ou à fissures importantes.

MESURE DE L'ABSORPTION D'EAU PAR IMMERSION

L'échantillon sec est immergé :

- jusqu'au 1/4 de sa hauteur pendant 1 heure;
- puis jusqu'à la 1/2 pendant 23 heures;
- et totalement pendant 24 heures, c'est-à-dire jusqu'à atteindre une durée totale de 48 heures.

Expression des résultats

$$\left(\begin{array}{l} \text{Teneur en eau} \\ \text{par immersion} \end{array} = \frac{\text{poids humide} - \text{poids sec}}{\text{volume}} \times 100 \right)$$

$$\left(\begin{array}{l} \text{Coefficient d'absorption} \\ \text{par immersion} \end{array} = \frac{\text{teneur en eau (\%)}}{\text{porosité (\%)}} \times 100 \right)$$

également appelé coefficient de saturation ou coefficient d'Hirschwald.

La porosité de l'échantillon qui est prise en compte est obtenue soit par immersion sous vide, soit par passage dans un banc de mise sous pression.

MESURE DE L'ABSORPTION D'EAU SOUS VIDE

- Les échantillons secs sont placés dans un dessiccateur;
- Le vide est effectué à l'aide d'une trompe à eau pendant 1 heure; on obtient un vide correspondant à une pression résiduelle de 20 à 30 mm.
- On introduit de l'eau, préalablement dégazée, en 3 fois, toutes les 30 à 40 mn.

- Ensuite le vide est maintenu pendant 1 heure;
- Puis le vide est cassé et on laisse les blocs immergés pendant 24 heures.
- On pèse les blocs.

L'utilisation d'une pompe à vide à palettes (appareil peu onéreux) présente l'avantage de fournir un vide plus poussé (3 mn) plus rapidement (30 mn).

Expression des résultats

$$\left(\text{Teneur en eau sous vide} = \frac{\text{poids humide} - \text{poids sec}}{\text{volume}} \times 100 \right)$$

Cette teneur en eau peut être considérée comme la porosité totale dans le cas de petits échantillons (200 g) à porosité élevée.

MESURE DE L'ABSORPTION D'EAU PAR CAPILLARITE

Les blocs secs, d'élancement minimal 1, reposent sur les arêtes de baguettes triangulaires et la hauteur d'eau à leur base, 2 à 3 mm, est maintenue constante à l'intérieur d'une enceinte en plexiglas avec couvercle amovible, dans laquelle l'humidité relative se situe aux alentours de 90%. Les mesures de hauteur d'ascension capillaire et de poids sont effectuées après 1/2 h, 1 h, 2 h, 4 h, 8 h, 24 h et 48 heures.

Pour les roches très peu poreuses, il est nécessaire de disposer d'échantillons assez gros (1 – 1,5 kg). Pour les roches sombres à frange capillaire invisible, il est nécessaire de découper les 5 mm supérieurs de l'échantillon et d'interposer une feuille de plastique, puis, à intervalles réguliers, de comparer rapidement la couleur de l'échantillon (plus sombre lorsque l'eau atteint le sommet) avec celle de la plaque restée sèche, en enlevant la feuille de plastique durant quelques secondes.

On considère que l'eau atteint le sommet lorsque la couleur change.

Expression des résultats

– La courbe de vitesse d'ascension capillaire est tracée en portant en abscisse le temps et en ordonnée la hauteur mesurée. On peut également tracer des courbes en portant en abscisse la racine carrée du temps en mn

$$\left(\text{Coefficient de capillarité } C = 100 \frac{M}{S\sqrt{t}} \right)$$

ou M — masse totale d'eau absorbée (en g) depuis le début de l'immersion;
 S — section (en cm²) de la face inférieure de l'éprouvette;
 t — temps total (en mn), écoulé depuis le début de la remontée capillaire;
 — Courbe pondérale de remontée capillaire (courbe de prise de poids) en portant \sqrt{t} en abscisse et $\frac{100M}{S}$ en ordonnée.

Cette courbe s'avère très utile dans le cas d'échantillons sur lesquels la frange de montée capillaire n'est pas visible.

INTERET DE CES ESSAIS ET PROBLEMES EN SUSPENS

Facilement réalisables avec un équipement peu important, ces essais simples se sont révélés être bien adaptés pour l'étude des caractéristiques physiques des roches calcaires assez poreuses (au-dessus de 6—7% de porosité). Par contre, pour les roches peu poreuses à pores très fins ou les roches fissurées de nouvelles recherches en cours aboutiront à proposer des normes différentes allant, en général, dans le sens d'une plus grande sévérité. Ainsi, en ce qui concerne les calcaires à microporosité importante et les granites, la norme définissant le poids sec (écart de moins de 1/1000-ème à 24 h d'intervalle) le sous-estime. Il faudrait la fixer à 0,5/1000-ème ou même à 0,1/1000-ème ce qui aurait pour conséquence d'allonger considérablement la durée de l'essai. De même, les méthodes de saturation en eau sont insuffisantes et le calcul de la porosité d'après ces résultats aboutit également à la sous-estimer.

Les recherches doivent être poursuivies dans ce domaine car, même pour les roches calcaires, les relations entre les paramètres physiques ne sont pas clairement établies (LETAVERNIER, 1984).

Mais, quoi qu'il en soit, nous sommes en possession d'un ensemble de normes permettant de caractériser chaque roche. Nous proposons aux géographes ces normes seulement pour un temps donné (5 ou 10 ans) puisqu'il faudra les améliorer notamment pour les roches cristallines peu poreuses. Actuellement, en raison de la dispersion des méthodes, aucune comparaison de résultats n'est possible.

Un pas important vient d'être franchi par LETAVERNIER (1984) dans l'étude des roches calcaires puisque, à partir du pourcentage de la porosité de fissures et de la vitesse d'ascension capillaire on peut respectivement calculer la perméabilité et connaître la taille moyenne des pores et l'existence d'un macroporosité. Nous sommes donc maintenant en possession de l'essentiel des paramètres à connaître pour l'étude des altérations et ce, sans avoir recours à un appareillage lourd excepté pour les roches peu poreuses.

B. GENESE DE SOLS CRYOTURBES OU EN GOUTTES PAR GONFLEMENT
CRYOGENIQUE DIFFERENTIEL
(B. VAN VLIET-LANOË ET J. P. COUTARD)

Pour expliquer la genèse des cryoturbations, un certain nombre d'hypothèses ont été formulées, voir expérimentées ces dernières années. D'autres semblent mises à l'écart comme c'est le cas de la convexion et de la pression congélistatique.

L'hypothèse proposée par Sharp en 1942 fait appel au gonflement cryogénique différentiel de matériaux en relation avec la formation de glace de ségrégation. Le matériel sous-jacent et latéral par rapport aux masses en cours de gonflement serait comprimé et injecté latéralement. A la fonte de la glace, de nouvelles perturbations apparaissent. Cette théorie a été notamment reprise par DYLIKOWA (1961), CORTE (1972), WASHBURN (1973) et PISSART (1976).

Une autre hypothèse proposée par CEGLA et DŻULYŃSKI (1970) fait appel au load casting, c'est-à-dire à une instabilité hydrostatique de matériaux de densités différentes, lorsqu'ils sont saturés en eau au dégel; il y aurait alors descente de masses plus denses dans un matériel qui l'est moins. Cette hypothèse a été récemment reprise par VANDENBERGE et VANDENBROEK (1982) qui pourtant arrivent à la conclusion que les matériaux saturés d'eau ont des densités très voisines malgré leur diversité granulométrique.

Nous développerons la première hypothèse et réfuterons pro parte la seconde sur la base d'observations récentes effectuées en milieu périglaciaire actif ou fossile et au cours d'expériences.

CRYOTURBATIONS ACTIVES DE GASBU,
KONGSFJORD, COTE NORD-OUEST DU SPITZBERG

Ces formes actives, étudiées par VAN VLIET-LANOË (1983) affectent un sable éolien, modérément gélif, finement stratifié et de 20 à 30 cm d'épaisseur.

Ce dépôt repose sur une formation glacio-marine complexe située à 2 mètres environ au-dessus du niveau des hautes mers, piégé sur un îlot calcaire fossilisé par un sandur. Le pergélisol est actuellement à 80 cm de profondeur, de la mi-juillet à la fin août; une ancienne semelle d'accumulation organo-limoneuse s'observe localement. La topographie est ici essentiellement plane et associée à un réseau métrique (3 m de maille) de fentes de rétraction thermique et, d'autre part, à un réseau de dessiccation de maille décimétrique (30 à 40 cm), affectant uniquement la formation éolienne.

Le drainage est de type imparfait, c'est-à-dire que l'ensemble du profil reste dans la frange capillaire de la nappe aquifère. Cette nappe stationne à 50 cm de profondeur de la mi-juillet (fin du dégel) à la fin octobre (début de l'engel profond). Son niveau fluctue peu d'une année sur l'autre.

Notons qu'en milieu identique mais bien drainé, les cryoturbations évoluent en hummocks alors que dans la zone où la nappe est affleurante, elles disparaissent.

Ces cryoturbations (fig. 1) montrent une injection des couches sous-jacentes dans les fentes de dessiccation et surtout dans celles de contraction thermique, à l'aplomb desquelles elle peut évoluer en forme de diapir (fig. 1-B). Ces fentes sont béantes en automne, emprisonnant des feuilles entières de saule polaire ou du sable éolien frais (fig. 1-C). Notons que dans ce dernier cas, l'injection ne se fait pas toujours à l'aplomb exact de la fente.

Ces injections se produisent aussi bien dans le cas de matériel fin reposant sur un matériel grossier que dans le cas inverse (fig. 1-D), ce qui réfute une bonne part de la théorie du load casting.

L'étude micromorphologique de la base des cellules de sable éolien et des injections révèle que la glace de ségrégation a affecté ensemble ces deux matériaux, postérieurement à la déformation des couches sous-jacentes: une structure lamellaire fine, à légère organisation de type gel-dégel alterné (VAN VLIET-LANOË, 1976) s'observe horizontalement dans la base du sable; le matériel injecté quant à lui présente une structure lamellaire fine et simple, horizontale, c'est-à-dire perpendiculaire à l'injection, associée à des paillettes minérales redressées. Ceci signifie qu'il n'y a pas eu dans ce cas-ci (fig. 1-A, B) de liquéfaction de la base des cellules au dégel mais que l'essentiel de la déformation se fait à l'engel.

Le profil thermique du sol suivi en continu pendant une année présente une grande inertie en raison de la position de la nappe. Pour cette raison, il n'y a pas formation de talik de longue durée à l'engel, ce qui démontre que l'ancienne hypothèse congélistatique est mal fondée.

Le sable éolien est daté grossièrement par la présence à sa base de poussières de charbon minéral liée à la mise en activité de la mine de Ny Alesund en 1917. Il en résulte que ce matériel a subi entre 60 et 100 cycles de gel-dégel au cours et postérieurement à sa mise en place. Actuellement, l'activité éolienne semble plus restreinte.

OBSERVATIONS EXPERIMENTALES RECENTES

Lors d'expériences conduites par PISSART en 1979 (publiées en 1982) de petits plots de limon colorés ont été entourés de graviers lavés saturés d'eau et rapidement drainés juste avant l'engel, ce qui les place dans des conditions de drainage artificielles équivalentes à celles du site de Gåsbu. Après 22 cycles de gel-dégel cette expérience a abouti à la déformation en forme de poire des cylindres: le gonflement cryogénique du plot affecté par la glace de ségrégation en lentilles est bloqué vers le haut par le gravier cimenté par la glace; il s'exprime donc dans le substrat non encore gelé. L'inverse se produit si le gravier n'est pas

cimenté (sol à buttes). L'étude micromorphologique que nous avons faite ultérieurement (VAN VLIET-LANOË, 1982) montre l'acquisition d'une structure granulaire dans la moitié supérieure du plot cryoturbé, la base conservant une structure lamellaire.

Une seconde expérience, conduite par COUTARD et MÜCHER (1983) a fait apparaître dans un limon stratifié des injections de matériaux du substrat; elles se produisent sur une dizaine de centimètres de hauteur le long de fentes de dessiccation préalablement existantes. Ceci s'est produit lors de 18 alternances de gel-dégel, dans la zone de remontée capillaire de la nappe, et ce, en l'absence de base rigide (fond de bac ou pergélisol). L'étude micromorphologique (COUTARD et MÜCHER, 1983) a mis en évidence l'apparition de structures granulaires dans la zone supérieure des matériaux injectés de texture limono-sableuse et surtout le caractère polyphasé de l'injection.

Enfin, une expérience actuellement en cours au Centre de Géomorphologie, inspirée des observations du site de Gâsbu permet de distinguer un certain nombre de phénomènes importants. En drainage imparfait, quelle que soit la vitesse d'engel, la pénétration du front de gel est très rapidement amortie: l'apport thermique de la nappe, en raison de la cryosuccion, entrave la progression du front de congélation, même si la température de la nappe est proche de $+1^{\circ}\text{C}$, et favorise la ségrégation de glace dans les sites sensibles. La base de plots limoneux, enfouis cette fois dans du sable présente grâce à ce phénomène, un retard à l'engel de l'ordre de 12 heures pour une température de l'air maintenue à -10°C . Au dégel, le phénomène de retard subsiste pendant une période équivalente, en raison de l'abondance de la glace de ségrégation.

Après 12 cycles successifs, la forme des plots superficiels a évolué. Macroscopiquement, on note comme chez PISSART (1982) un étranglement de la zone des plots affleurant la surface alors que les mesures topographiques montrent que la masse limoneuse descend progressivement.

CRYOTURBATIONS FOSSILES

Les cryoturbations sont très fréquentes dans les formations superficielles sableuses ou limoneuses de l'Europe de l'Ouest. Celles affectant à la fois des matériaux crayeux et limoneux sont à cet égard très instructives en raison de la stabilité des agrégats produits par la glace de ségrégation. Que ce soit en Picardie ou dans le Laonnais (France), elles présentent des figures de déformations identiques ou plus évoluées que celles de Gâsbu, avec persistance de la structure lamellaire au centre des cellules et en plus celle d'une structure granulaire très bien développée dans les injections, assez comparable à son équivalent expérimental. Ceci est valable aussi bien pour des involutions simples que pour des sols à gouttes. Certains pourront dire que ces structures sont superposées à postériori

Tableau I

Principales mesures effectuées au Centre de Géomorphologie

| Type d'appareil | Nature de la mesure | Type d'appareil | Nature de la mesure |
|----------------------------|---|--|---|
| Porosimètre à mercure | Répartition de la porosité ouverte en fonction du diamètre d'accès des pores (porosité totale et granulométrie des pores) | Séchoir +50°C Balance Récipient + eau | Poids sec Volume apparent |
| Perméamètre à air ou à eau | Débit d'air ou d'eau à travers la roche | Récipient pour immersion dans l'eau | Teneur en eau par absorption par immersion |
| Banc de mise sous pression | Teneur en eau par absorption sous pression | Bac à niveau d'eau constant Cloche pour limiter l'évaporation | Teneur en eau par absorption par capillaire |
| Appareil à ultrasons | Vitesse de propagation des ondes longitudinales à travers la roche | Trompe à eau dessiccateur | Teneur en eau par absorption sous vide |
| | | Pompe à vide à palettes | Teneur en eau par absorption sous vide |

aux involutions. Or à Beerse (Campine anversoise, Belgique) dont la stratigraphie des sables de couverture est en cours d'étude (HAEST, 1983), des lits limoneux interstratifiés dans des sables lités sont également affectés par des involutions du même type. A nouveau, les plages limoneuses horizontales présentent une structure lamellaire fine, alors que les injections verticales possèdent une structure granulaire moyenne. Dans ce cas-ci, il s'agit bien de structures apparues lors d'une stabilisation de la surface topographique dans des conditions similaires à celles de Gåsby, ce niveau à cryoturbations ayant été très rapidement enfoui par des dépôts éoliens sableux non cryoturbés.

D'autre part, GOŹDZIK (1964) a noté lors d'une étude de la répartition topographique de ces formes qu'elles étaient en général présentes sur la basse terrasse de vallées peu importantes ou dans des dépressions fermées d'interfluvés. Ces observations montrent que les zones favorables sont celles où une nappe phréatique a pu stagner à faible profondeur, associée ou non à un pergélisol. En fait, en milieu à pergélisol discontinu comme cela a souvent été le cas de nos régions, le pergélisol est souvent absent dans de telles positions topographiques.

Notons que dans le Laonnais ou dans la vallée flamande (HEYSE, 1975), des traces de phénomènes d'oxydo-réduction associées aux cryoturbations attestent d'une hydromorphie syngénétique suggérant la proximité d'un niveau phréatique.

DISCUSSION

La somme des observations présentées précédemment nous permet de reconstituer la genèse des involutions simples et de comprendre celles des sols à gouttes.

Lorsque deux matériaux de gélivité différente sont superposés et, à condition qu'ils soient situés dans la zone de remontée capillaire de la nappe phréatique avec ou sans pergélisol, les conditions sont réunies pour obtenir, en présence d'alternances répétées de gel-dégel, des involutions.

L'évolution se fait selon des stades successifs suivants (fig. 2):

1. Ouverture des réseaux de fentes en fin d'été, au début de l'engel par dessiccation ou/et retrait thermique (fig. 2-1);

2. Rigidification de la couche superficielle gelée avec plus ou moins de glace de ségrégation selon la texture;

3. Déformation et injection progressive du substratum quelles que soient sa texture et sa nature, lorsqu'il est comprimé voire pénétré à la manière d'un poinçon par les polygones superficiels en cours de gonflement sous l'effet de la ségrégation de glace. Ce phénomène peut se produire à différentes échelles (fig. 2-2):

- La proximité de la nappe favorise le gonflement cryogénique différentiel et maintient le substrat dégelé (effet tampon).

- J. R. MACKAY et D. K. MAC KAY (1976) ont montré qu'il existait en période de regel un léger accroissement de la pression interne des cellules cryogéniques des cercles de pierres, à la fois rigidifiées par la dessiccation superficielle (Inuvik), et par la glace de ségrégation lorsqu'il y en a. Ils considèrent ces formes comme inertes. VAN VLIET-LANOË (1983) a montré que ces formes, apparaissent au Spitzberg en drainage imparfait tout comme les involutions de Gâsbu. Ces observations recoupent en partie celles faites expérimentalement par CORTE (1972).

- Ce processus d'injection se produit lentement; il est la somme d'une série de déplacements minimes (30 cm en 100 cycles à Gâsbu, 10 cm en 18 cycles expérimentaux à Caen) comme l'avait proposé PISSART en 1982.

- Dans tous les matériaux, il n'y a pas de liquéfaction au dégel, c'est ce qui ressort de toutes les observations macro ou microstructurales.

Dans des matériaux limoneux, il ne semble pas y avoir de liquéfaction au moment du regel, les structures créés par la glace étant très stables à la

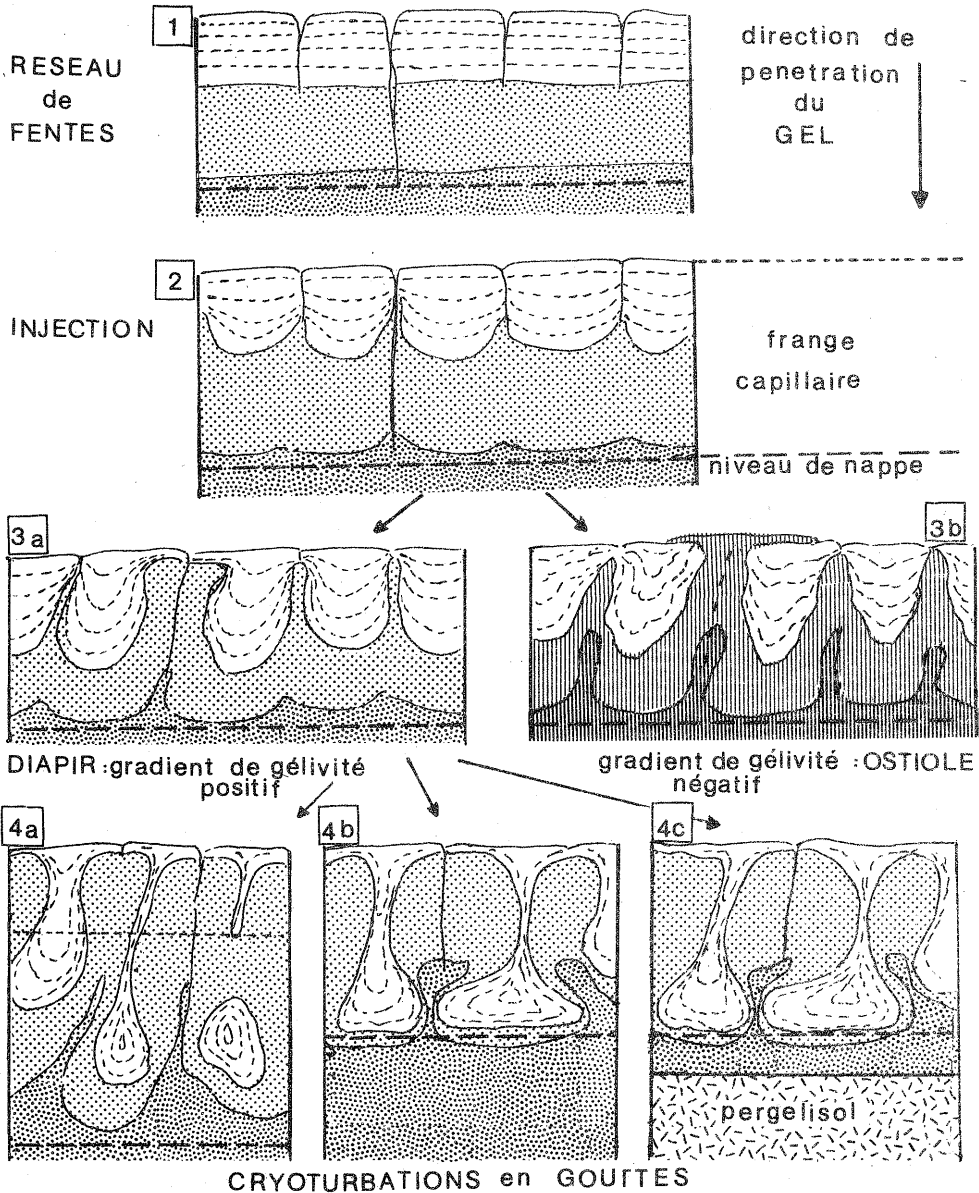


Fig. 2. Schéma de formation des cryoturbations et sols à gouttes en fonction du drainage et du gradient de gélivité des sédiments

réhumectation (en raison de la viscosité de l'eau de fusion). Il existe tout au plus une déformation plastique des agrégats aboutissant à l'apparition d'un caractère granulaire (VAN VLIET-LANOË, 1982) au bout de plusieurs cycles efficaces (une vingtaine au minimum).

Par contre dans les matériaux instables, thixotropiques comme les sables et certains limons sablo-graveleux mouillés, il est possible qu'une certaine liquéfaction se produise immédiatement sous le front de gel (en milieu bien drainé à hummock il ne se produit qu'une déformation plastique); il se peut aussi localement de faibles surpressions cryogéniques produisent un dégel local si l'un des deux substrats en contact est soit un limon, soit une tourbe, soit encore une circulation d'eau et un gonflement cryogénique pour des températures nettement inférieures à 0°C (BURT et WILLIAMS, 1976). Enfin un dernier phénomène peut encore accentuer cet effet de surpression, il s'agit de la formation temporaire de glace de regel en profondeur, lors de l'inversion du gradient thermique au printemps (MACKAY, 1981; VAN VLIET-LANOË, 1983).

Quoi qu'il en soit en matériel sableux, il semble bien que la liquéfaction existe au regel puisque nous avons constaté une absence d'évolution microstructurale au niveau des injections de Gâsbu (structure lamellaire simple, recréée à chaque cycle).

4. Progressivement, l'injection s'épaissit et évolue en forme de diapir bloqué à proximité de la surface si sa texture est plus grossière et moins gélive que celle des polygones, c'est-à-dire lorsqu'on se trouve dans un gradient de gélivité positif. Par contre, si sa texture est plus gélive que celle du matériel des polygones, son gonflement cryogénique concurrencera celui du polygone et la couche superficielle crèvera: un ostiole pourra se former si le gradient de gélivité est négatif (fig. 2-3b; VAN VLIET-LANOË, 1983; CORTE, 1972).

5. En même temps, le polygone descend très progressivement en s'arrondissant en forme de gouttes et en s'étranglant vers le haut (PISSART, 1982). Il finira par atteindre la nappe phréatique où sa progression sera bloquée d'une part, par l'apport thermique de la masse d'eau provoquant un ralentissement considérable des processus, et d'autre part, peut-être aussi par la rigidité relative du sédiment gorgé d'eau. D'après nos observations thermiques à Gâsbu, la remontée du pergélisol en Octobre n'a été que d'une dizaine de centimètres; par contre, l'engel de l'ensemble du profil s'est produit très rapidement, alors que la température de la nappe s'était abaissée vers $-0,5^{\circ}\text{C}$. Ceci suppose l'apparition brutale d'un véritable béton glace/sol à l'emplacement de la nappe, bloquant l'ensemble des processus de ségrégation de glace. Normalement, le polygone devra s'étaler en pied d'éléphant (fig. 2-4b); malheureusement, les cryoturbations de Gâsbu n'étaient pas assez évoluées pour mettre ce phénomène en évidence. En présence simultanée de pergélisol et de nappe perchée, on se retrouve dans le cas précédent (fig. 2-4c).

— L'étalement de gouttes sur un plan horizontal n'est donc pas exclusivement représentatif d'un sommet de pergélisol fossile comme GULLENTOPS et PAULISSEN (1978) l'ont proposé. Il est seulement la résultante de la présence d'une nappe, perchée ou non sur un pergélisol.

6. Si une forme est ébauchée, que pour des raisons climatiques ou physiographiques le niveau de la nappe baisse (réchauffement, érosion et rabattement de la nappe) et, que la forme suit la descente de la frange capillaire, tout en restant dans la zone d'engel saisonnier, la goutte s'étirera progressivement vers le bas, avec parfois rupture du pédoncule d'origine (fig. 2-4a).

7. Enfin, si une telle forme reste enfouie à faible profondeur, elle pourra continuer à évoluer même sporadiquement tant qu'elle sera dans la zone de remontée capillaire d'une nappe.

— Ceci expliquerait pourquoi, dans certains niveaux de terrasses, les fentes à colmatage limoneux disparaissent et évoluent progressivement en „macro-gouttes” ou en poches en forme de chaudron. L'existence de séries complexes de cryoturbations, imbriquées les unes dans les autres (HEYSE, 1975) devient de ce fait compréhensible d'un point de vue dynamique.

CONCLUSION

Les cryoturbations et les sols en forme de gouttes sont des formes périglaciaires créées à partir de réseaux polygonaux, par injection de substrat à l'aplomb des fentes liée au gonflement cryogénique différentiel des matériaux et à condition que l'ensemble soit compris dans la frange capillaire d'une nappe phréatique. Ces formes ne tiennent pas compte du gradient de densité, il ne s'agit pas du phénomène de „load casting” bien que la convergence morphologique soit saisissante. Par contre, leur expression se diversifie selon que l'on a affaire à un gradient de gélivité positif (fig. 1-A), à un gradient négatif ou à une situation mixte. Le gradient de gélivité positif est par exemple responsable des grands sols polygonaux triés; ici l'injection est accélérée par la cryoexpulsion des pierres (VAN VLIET-LANOË, 1983).

Toutes ces formes ne sont pas obligatoirement l'expression de la présence d'un pergélisol, elles se produisent déjà dans des conditions de gel-dégel modéré. L'aplatissement des gouttes en pied d'éléphant est seulement indicateur de la proximité d'un niveau aquifère.

A condition que le régime hydrique soit maintenu ou régulièrement restauré, ces formes peuvent être polygénétiques. Par contre, si des modifications hydriques ou/et thermiques apparaissent, leur évolution peut être bloquée à des stades différents soit juvéniles soit séniles.

Tous ces critères permettent d'expliquer la grande variété et variabilité de ces formes au sein d'un même environnement et qui plus est, lorsque d'autres mécanismes comme la cryoreptation, l'action des pipkrakes ou l'érosion entrent en jeu.

Enfin, ce mécanisme est actif aussi bien à l'échelle centimétrique qu'à l'échelle plurimétrique comme c'est le cas de la majorité des phénomènes liés à la ségrégation de glace.

Bibliographie

- BURT, P., WILLIAMS, P. J., 1976 — Hydraulic conductivity in frozen soils. *Earth surface processes and landforms*, 1; p. 349—360.
- CEGLA, J., DŻULYŃSKI, S., 1970 — Układy niestatecznie warstwowe i ich występowanie w środowisku peryglacjalnym (summary: Systems with reserved density gradient and their occurrence in periglacial zones). *Acta Univ. Wratislav., Studia geogr.*, 13; 17—42.
- CORTE, A., 1977 — Laboratory formation of extrusion features by multicyclic freeze-thaw in soil. *Bull. Centre Géomorph. C.N.R.S., Caen*, 13—15; p. 157—180.
- COUTARD, J. P., MÜCHER, H., 1983 — Deformation of laminated silt loam due to repeated freezing and thawing. *Earth surface processes and landforms*, (à paraître).
- DYLIKOWA, A., 1961 — Structures de pression congélistatique et structures de gonflement par le gel de Katarzynów près de Łódź. *Bull. Soc. Sci. Lettre Łódź*, 12; 1—23.
- GOŹDZIK, J., 1964 — Répartition topographique des structures périglaciaires. *Biul. Peryglacjalny*, 14; p. 215—249.
- GULLENTOPS, F., PAULISSEN, E., 1978 — The drop soil of the Eisdien type. *Biul. Peryglacjalny*, 27; p. 105—115.
- HAEST, R., 1983 — Stratigraphie du Tardiglaciaire et évolution pédologique dans les argilières de Beerse. *Notes et comptes rendus du groupe régionalisation du periglaciaire*, 8; (à paraître).
- HEYSE, I., 1975 — Bijdrage tot de geomorfologische kennis van het noordwestelijk deel van de Vlaamse Vallei en haar randgebieden. Univ. Etat de Gand, Fac. Sci., thèse de doctorat; 225 p.
- LAUTRIDOU, J. P., OZOUF, J. C., 1980 — Définition de normes d'analyses physiques de roches. I — Acquisitions nouvelles sur la porosité et sur la perméabilité des roches au cours des dix dernières années. II — Étude critique des normes employées et proposition de nouvelles normes. Centre Géomorph. C.N.R.S., Comm. d'étude des phénomènes périglaciaires et Comm. de géographie des socles; 21 p. et 22 p., mult.
- LETAVERNIER, G., 1984 — Gélivité des roches calcaires. Thèse de 3-ème cycle, Univ. de Caen, U.E.R. Sci. Terre et Aménagement Régional; 181 p.
- MACKAY, J. R., MAC KAY, D. K., 1976 — Cryostatic pressure in non-sorted circles (mud hummocks) Inuvik, Northwest Territories. *Can. Jour. Earth Sci.*, 13; p. 889—897.
- MACKAY, J. R., 1981 — Active layer slope movement in a continuous permafrost environment, Garry Island, Northwest Territories, Canada. *Can. Jour. Earth Sci.*, 18; p. 1666—1680.
- PISSART, A., 1976 — Sols à buttes, cercles non-triés et sols striés non-triés de l'île de Banks (Canada, N.W.T.). *Biul. Peryglacjalny*, 26; p. 275—285.
- PISSART, A., 1982 — Déformations de cylindres de limon entourés de graviers sous l'action d'alternances gel-dégel. Expériences sur l'origine des cryoturbations. *Biul. Peryglacjalny*, 29; p. 219—229.
- SHARP, R. P., 1942 — Periglacial involution in northeastern Illinois. *Jour. Geol.*, 50; p. 113—133.
- VANDERBERGE, J., VANDENBROEK, P., 1982 — Weichselian convolution phenomena and processes in fine sediments. *Boreas*, 11; p. 229—315.
- VAN VLIET-LANOË, B., 1976 — Traces de ségrégation de glace en lentilles associées aux sols et phénomènes périglaciaires fossiles. *Biul. Peryglacjalny*, 26; p. 41—54.
- VAN VLIET-LANOË, B., 1982 — Structures et microstructures associées à la formation de glace de ségrégation. Leurs conséquences. in: „Roger Brown Memorial”, 4th Proc., 4th Can. Permafrost Conf., Calgary, March 1981. N.E.C., H. French, ed.; p. 116—122.
- VAN VLIET-LANOË, B., 1983 — Etudes cryopédologiques au S du Kongsfjord — Svalbard. Rapport de la mission Spitzberg 1982. Publ. interne du Centre Géomorphologie, Septembre 1983; 38 p.
- WASHBURN, A. L., 1973 — Periglacial processes and environments. London; 320 p.