

JEAN-PIERRE COUTARD*
BRIGITTE VAN VLIET-LANOË*

Caen

CRYOEXPULSION ET CRYOREPTION EN MILIEU LIMONO-ARGILEUX. EXPÉRIMENTATION EN LABORATOIRE

Résumé de l'auteur

Deux expériences de laboratoire concernant la cryoexpulsion d'objets allongés sur une pente de 12° constituée de limon argileux sont décrites. Toutes deux ont été effectuées dans un contexte bien drainé et mettent en évidence la relation directe existante entre le gonflement cryogénique, la surface verticale enfouie de l'objet et sa vitesse d'expulsion. La majorité des objets a été extraite de sol par la traction cryogénique en moins de 7 cycles gel-dégel modérés. Il n'y a pas eu formation de glace à la base des objets. En raison de la pente existante, les objets sont rapidement couchés au fur et à mesure de leur expulsion et réorientés selon l'axe de plus grande pente par la cryoreption. Cette approche expérimentale permet de mieux comprendre les phénomènes de tri périglaciaire.

Abstract

Two experiments in laboratory concerning stone upfreezing in a clayish loam with a 12° slope are described. Both were performed in well drained conditions and show clearly the direct correlation between frost heaving buried vertical surface of the object and its speed of upfreezing. Most of the objects was extracted from the soil by frost pull in less than 7 gentle freeze-thaw cycles. No segregated ice occurred at the base of the objects. Because of the existing slope, the frostpulled objects were bent and laid by frostcreep on the soil surface in conformity with the main slope axe. This experimental approach allows a better understanding of periglacial sorting features.

INTRODUCTION

Deux essais simultanés ont été pratiqués dans une des cellules expérimentales du Centre de Géomorphologie en 1984.

Le premier d'entre eux avait pour but de tester le rôle de la forme et de la position initiale de divers objets sur le rythme de leur cryoexpulsion verticale. Pour cela, des plaques et des barres de brique, des cubes de brique et de calcaire et des galets sphériques de grès ont été placés au sein d'une couche de limon argileux, épaisse de 30 cm. Cette dernière reposait sur un plan, incliné de 12°, constitué du sable grossier, servant à la fois pour l'adduction d'eau pendant le gel et pour le drainage lors de dégel. Cet ensemble a été soumis à 22 cycles gel-dégel. Le limon argileux (médiane 15 µm, 21% < 2 µm) provenait de l'horizon argilique d'un sol brun lessivé développé sur les loess de la région de Caen.

Le second essai avait pour objectif de contrôler l'influence combinée de la cryoreption (frost creep) et de la cryoexpulsion (stone upfreezing) sur l'orientation de plaques posées à plat sur le sol ou de chant dans le limon et formant un angle variable avec la ligne de plus grande pente du versant.

Chaque cycle gel-dégel a duré trois semaines avec un gel modéré amenant progressivement la température de l'air à -10°C, celle de la surface du sol entre -5.5°C et -6°C, celle du sol à 6 cm de profondeur entre -3 et -4°C et

* Centre de Géomorphologie du C.N.R.S., rue des Tilleuls, 14000 Caen, France.

à 12 cm de profondeur entre -1 et 2°C . La durée de gel était de 10 à 12 jours. La descente du front de gel dans le limon bien alimenté en eau était relativement lente, (0.7 mm/heure), entre la surface et 12 cm de profondeur; elle s'accélérat ensuite en raison du tarissement du sous-écoulement entretenu en début de gel dans le sable sous-jacent.

Le gonflement cryogénique de la couche de limon, variant de 60 à 75 mm selon l'état thermique du système non-gelé et la durée de l'alimentation en eau, traduisait une bonne ségrégation de glace sous forme de lentilles; le dégel s'effectuait sur une dizaine de jours à la température ambiante de hall d'expérience.

LA CRYOREPTATION VERTICALE

Plusieurs dispositions ont été adoptées (fig. 1): éléments enterrés dans le sol avec leur sommet situé à une profondeur égale au tiers de leur hauteur, soit 6 cm pour les plaques et les barres mesurant 18 cm de long; 2) éléments affleurant à la surface du sol; 3) éléments respectivement sortis du sol sur le tiers et sur la moitié de leur hauteur. Tous les éléments allongés étaient orthogonaux à la pente du versant donc subverticaux dès l'origine. Deux tailles différentes ont été retenues pour chaque forme.

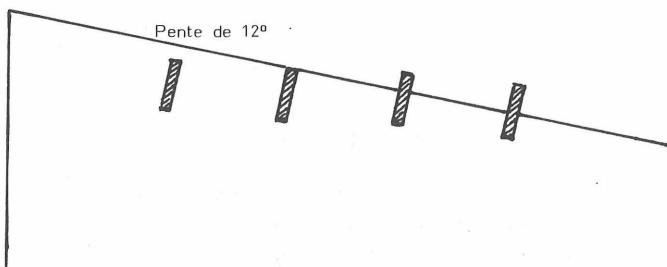


Fig. 1 — Dispositions initiales de barres

Les mesures d'expulsion ont été réalisées pendant les sept premiers cycles car ensuite pratiquement tous les éléments de forme allongée étaient expulsés, couchés sur le sol et soumis uniquement à la cryoreptation. L'inclinaison et les oscillations nombreuses des grands éléments pendant les derniers cycles efficaces ont rendu les mesures de plus en plus délicates. Dans ce cas, le chiffres retenus ont été les moyennes entre les valeurs du déplacement relevées à l'aval et à l'amont des objets. Le comportement des cubes et des galets sphériques placés dans la partie basse de la pente a été trop hétérogène et irrégulier pour que des mesures significatives puissent être effectuées.

Les résultats sont consignés au sein des tableaux et figures au fur et à mesure de leur commentaire. L'importance de la cryoexpulsion peut être appréciée en calculant le rythme d'expulsion par cycle, d'une part, et le déplacement total des objets, d'autre part.

On constate que plus les plaques sont encastrées dans le sol au début de l'essai, plus leur rythme d'expulsion est rapide. Cela est valable pour les petites

Tableau 1

Position initiale	Vitesses moyennes d'expulsion	
	(a)	(b)
Plaques enterrées	14 et 20 mm	10 à 12 mm
Plaques affleurantes	16 et 17 mm	7 à 10 mm
Plaques saillant sur 1/3 de leur hauteur	8 et 9 mm	4 à 5 mm
Plaques saillant sur 1/2 de leur hauteur	3 et 5 mm	\simeq 2 mm

Vitesses moyennes d'expulsion des plaques en mm par cycle:

- (a) plaques de $18 \times 8 \times 2$ cm
 (b) plaques de $9 \times 4 \times 1$ cm

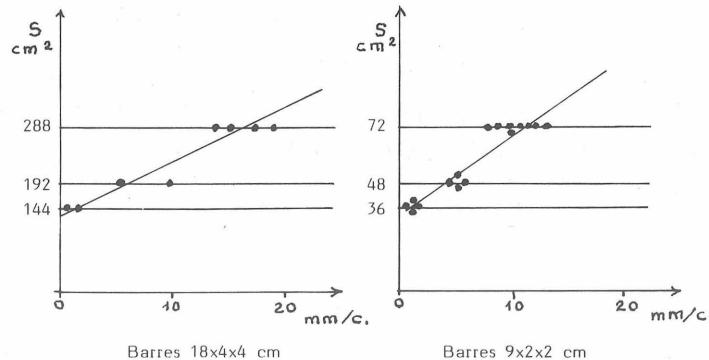
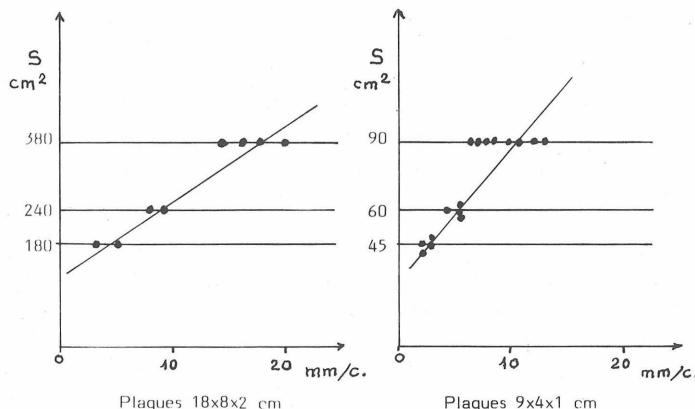


Fig. 2 — Rapport entre le rythme de la cryoexpulsion et la surface verticale initialement prise dans le sol

comme pour les grandes. C'est l'importance de la surface verticale enserrée par le sol qui se dilate en raison de la formation des lentilles de glace (composante verticale mais aussi, dans une moindre mesure, horizontale) qui est le critère dominant comme l'expriment bien les graphiques de la figure 2. Par exemple, pour les grandes plaques, cette surface est de 360 cm^2 pour celles qui sont enterrées ou affleurantes, de 240 cm^2 pour celles saillant d'un tiers de leur hauteur, et de 180 cm^2 pour celles saillant originellement de la moitié de leur hauteur.

Le tableau 2 donne les chiffres du déplacement vertical total des plaques avant leur basculement sur la pente.

Tableau 2

Position initiale	Déplacement total	
	(a)	(b)
Plaques enterrées	10 et 12,5 mm	6 à 8,5 mm
Plaques affleurantes	10 et 10,5 mm	3 à 6 mm
Plaques saillant sur 1/3 de leur hauteur	5,5 et 6,7 mm	1,5 à 2,5 mm
Plaques saillant sur 1/2 de leur hauteur	2 et 3 mm	$\simeq 1$ mm
Déplacement total des plaques en cm:		
(a) plaques de $18 \times 8 \times 2$ cm		
(b) plaques de $9 \times 4 \times 1$ cm		

La cryoexpulsion agit peu sur les plaques à demi sorties du sol dès l'origine de l'essai: déplacement total faible et rythme d'expulsion peu élevé. Elles ont d'ailleurs été rapidement basculées et entraînées par la cryoreptation.

A l'opposé, les plaques enterrées et affleurantes ont subi un déplacement important dès le premier cycle gel-dégel; l'expulsion totale s'est effectuée rapidement. Cependant, comme dans le cas du groupe précédent, dès qu'elles ont émergé du sol sur au moins la moitié de leur hauteur, elles ont basculé sur la pente. La partie enterrée des plaques se réduisant de plus en plus, le rythme d'expulsion a diminué progressivement, passant par exemple d'environ 3 cm à 0,5 cm par cycle pour les grandes plaques initialement affleurantes entre le 1^{er} et le 6^{ème} cycles.

On notera que les grandes et les petites plaques ont subi un mouvement vertical total proportionnellement de même ampleur. Par contre, le rythme d'expulsion des petites a été plus lent. Ceci étant dû à leur moindre emprise dans la zone riche en lentilles de glace.

Une cavité béante, égale au volume expulsé des plaques, a subsisté très longtemps à la base de celles-ci, simplement enduite par une sorte de givre (glace en godets) avant d'être refermée lentement par la déformation du sol consécutive à la cryoreptation.

COMPORTEMENT DES BARRES

Comme les plaques, les barres ont été placées subverticalement (perpendiculairement à la surface de versant). Leur comportement a été très voisin de celui des plaques, et la relation entre l'importance des surfaces enterrées et le

rythme de la cryoexpulsion, très semblable (fig. 2). Les résultats acquis pour l'ensemble des plaques et des barres sont représentés sur la figure 3.

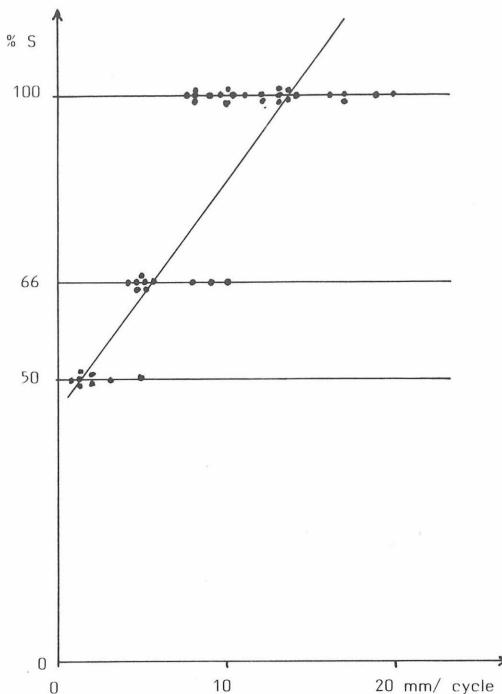


Fig. 3 — Rapport entre le rythme de la cryoexpulsion et le pourcentage de la surface verticale totale initialement enterrée. Ensemble des plaques et des barres

Tableau 3

Position initiale	Vitesses moyennes d'expulsion (a) (b)	
Barres enterrées	15 et 19 mm	13 à 14 mm
Barres affleurantes	13 et 17 mm	7 à 11 mm
Barres saillant sur 1/3 de leur hauteur	5 et 10 mm	5 à 6 mm
Barres saillant sur 1/2 de leur hauteur	2 et 3 mm	2 à 3 mm

Vitesses moyennes d'expulsion des barres en mm par cycle:
(a) barres de 18 × 4 × 4 cm
(b) barres de 9 × 2 × 2 cm

Comme dans le cas des plaques, il y a une relation linéaire entre l'importance des surfaces verticales enterrées et le rythme d'expulsion. La valeur totale et le rythme de l'expulsion sont faibles pour les barres initialement à demi-enterrees; les valeurs sont fortes au contraire pour les barres originellement entièrement enterrées ou affleurantes.

Tableau 4

Position initiale	Déplacement total	
	(a)	(b)
Barres enterrées	13 cm	8 à 9 mm
Barres affleurantes	9,5 et 12 mm	4,5 à 6,5 mm
Barres saillant sur 1/3 de leur hauteur	3,5 et 7 mm	3,0 à 3,5 mm
Barres saillant sur 1/2 de leur hauteur	1 et 2 mm	≈ 1 à 2 mm
Déplacement total des barres en cm:		
(a) barres de 18 × 4 × 4 cm		
(b) barres de 9 × 2 × 2 cm		

Le mouvement vertical est proportionnellement de même ampleur pour les petites et les grandes barres. Par contre, le rythme d'expulsion est comme pour les plaques, un peu plus lent pour les petites.

COMPORTEMENT DES CUBES ET DES GALETS

Un premier fait notable a été l'apparition progressive au bout de sept cycles des petits cubes de 4 cm de côté placés à l'origine sous 2 cm de limon. A la fin de l'expérience (22 cycles), tous les cubes de 4 ou de 8 cm de côté, initialement enterrés ou affleurants étaient sortis de 1 à 2 cm. Dans l'ensemble, leur mouvement vertical a donc été limité et lent; une vitesse maximale de 1 à 3 mm par cycle a pu être calculée pour quelques éléments. Les cubes dont le tiers ou la moitié de la hauteur étaient initialement hors du sol n'ont pas subi de mouvement vertical appréciable. Tous les cubes ont été entraînés par la cryoreptation avec pour résultante de nombreuses oscillations sur l'axe vertical et rotations dans le plan horizontal.

Les galets légèrement enterrés ou affleurants ont subi des mouvements assez anarchiques dont la résultante a été presque nulle voire négative: certains éléments dépassent en moyenne de 0,5 mm en fin d'essai. Ceux qui étaient saillant du tiers ou de la moitié de leur hauteur à l'origine ont seulement oscillé sur leur grand axe et se sont couchés dans le limon. Tous les galets ont subi un mouvement par solifluxion et un creux circulaire s'est créé autour d'eux (glace de ségrégation, sublimée en fin de cycle). En raison de leur localisation en bas de pente, ils étaient entourés par un limon très engorgé au dégel, ce qui a favorisé l'enfoncissement de certains éléments à ce moment du cycle.

COMBINAISON CRYOEXPULSION – CRYOREPTATION

Il y a lieu de distinguer l'évolution de l'ensemble des plaques (14 × 8 × 2 cm) posées à plat et affleurantes et celui de l'ensemble des plaques de même dimension enterrées dans le limon orthogonalement à la surface du sol (position sur chant).

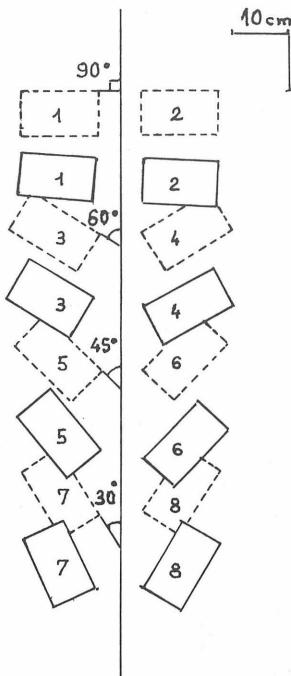


Fig. 4 — Évolution des plaques posées à plat: pointillés: situation initiale, trait plein: situation finale

PLAQUES POSÉES À PLAT

Au cours des 22 cycles, ces plaques ont subi un mouvement d'ensemble. Cela apparaît sur la figure 4 où on note seulement quelques variantes dans les inter-distances entre plaques contigües dues aux mouvements de rotation de plusieurs d'entre elles (1-2-4 et 7). Le déplacement global de l'ensemble nous est donné par celui des plaques (1) et (2) qui s'élève respectivement à 17,5 et 20 cm pour la (1) (cotes prises aux extrémités amont) et à 17,2 et 20,6 cm pour la (2) (*ibidem*). Le déplacement moyen des plaques (1) et (2) a été de 8,5 mm par cycle, mais il y a eu de fortes disparités entre les cycles (voir introduction) avec des valeurs extrêmes comprises entre 2 et 13 mm/cycle pour la plaque (1) par exemple. Il est important de noter que les mouvements de rotation certaines de certaines plaques ((1), (2), (5) et (7)) contribuent à placer ces dernières selon la ligne de plus grande pente.

PLAQUES POSÉES DE CHANT

Le mouvement est plus complexe que dans le cas précédent puisqu'il y a à la fois cryoexpulsion et fauchage par la cryoreptation. Sur 22 cycles, bien que les distances entre plaques aient parfois varié de quelques centimètres, en raison de pivots inégaux de celles-ci, il n'y a pas eu désorganisation complète de l'ensemble. Le déplacement total vers l'aval a été respectivement de 13,5 et 16 cm pour la plaque (9) et de 13,2 et 16,6 pour la plaque (10). Le mouvement a été plus important lors des premiers cycles: 8 à 15 mm/cycle au début, 5 mm/cycle en moyenne entre le 7^e et le 22^{ème} cycles. Le déplacement moyen sur 22 cycles a été de 6,7 mm/cycle.

Les plaques cryoexpulsées tendent à se mettre à plat sur le sol mais sur les 22 cycles, elles sont néanmoins restées relevantes, s'appuyant sur des bourrelets de limon gonflant fortement pendant le gel. Les plaques (9), (10) et (14) ont subi un mouvement de rotation tendant à mettre leur grand axe en conformité avec le sens de la pente (fig. 4).

DISCUSSION

Dans l'expérience conduite, c'est l'effet de traction vers la surface du sol (frost pull) engendré par le gonflement du matériel limoneux consécutif à la ségrégation de glace en lentilles qui a été le mécanisme quasi exclusif de la cryoexpulsion. Ce mécanisme est connu depuis longtemps (HÖGBÖM, 1910). Cependant BESKOW (1935) et KAPLAR (1965) ont mis en évidence un second processus, le frost push, poussée des éléments vers la surface par croissance de cristaux de glace à leur base. Nous n'avons pas constaté l'action de ce second mécanisme au cours de notre essai en milieu bien drainé, sans possibilité de ruissellement superficiel au dégel.

Les résultats acquis confirment les travaux antérieurs de PENNER (1974) et BURROUS (1977) montrant que ce sont surtout les pierres possédant un coefficient d'allongement élevé qui sont activement expulsées. De nombreuses observations de terrain de MORAWETZ (1932), PISSART (1977), LAUTRIDOU et al. (1984) et Centre de Géomorphologie (massif du Chambevron, 1975–1984) vont dans ce sens. Toutefois, l'expérience entreprise semble bien montrer qu'à coefficient d'allongement équivalent, les grands éléments sont expulsés plus rapidement que les petits, en relation directe avec le nombre de lentilles de glace enserrant l'objet. Il n'est pas raisonnable d'invoquer pour expliquer cette différence un rôle quelconque de la conductivité thermique plus importante de l'objet ou de la conductivité hydrique plus faible de ce dernier par rapport au sol: les caractéristiques des briques poreuses utilisées sont très voisines de celles du limon argileux encaissant.

Cette expulsion différentielle explique probablement ou au moins en forte partie les granoclassements observés dans les dallages nivaux situés sur les exutoires de lacs ou dans le fond des axes de drainage de certains vallons, caractérisés par l'existence en surface de grandes dalles et de grands blocs „flottant“ sur des éléments de granulométrie de plus en plus fine. C'est le cas aussi bien en milieu alpin, comme en plusieurs points du massif du Chambevron (Alpes méridionales) qu'en milieu arctique comme à Ossian Sars, dans le Kongsfjord (Spitzberg du N. W.). Cette observation est également valable pour l'expulsion de grandes dalles encaissées dans du matériel de calibre plus petit comme à la Gypière ou au plateau de Tuissier dans le massif du Chambevron, ou dans les champs de dalles des massifs granitiques anciens (Dartmoor en Cornouaille anglaise, Cairngorm en Écosse. Mont Jacques Cartier en Gaspésie, Monts du Forez, à l'est du Massif Central français, etc.). Ces plaques sont souvent simplement déchaussées du substrat rocheux sous-jacent. On retrouve vraisemblablement dans ce cas la double influence de la forme de l'élément et de l'importance de sa partie enterrée sur le rythme d'expulsion telle que ces deux expériences l'ont mise en valeur.

Il est plus difficile de cerner le rôle de la cryoexpulsion différentielle dans la naissance du granoclassement très souvent observé dans les cloisons grossières des sols polygonaux: petits débris du côté de la cellule fine, grands éléments dans le fossé du polygone. La genèse de ces formes est complexe et plusieurs processus différents peuvent aboutir à une même morphologie, au travers d'une succession de mécanismes (injection, glace de regel, cryoexpulsion, lessivage de particules) et en corrélation directe avec les conditons hydriques du milieu (lors du gel et lors de la fonte) et les propriétés physiques des matériaux (VAN VLIET-LANOË, 1988). Il faut rappeler que si beaucoup d'auteurs ont donné un rôle important à la cryoexpulsion dans la genèse des sols structurés périglaciaires (WASHBURN, 1956; PISSART, 1969; MACKAY, 1984) seule ou couplée à l'injection (VAN VLIET-LANOË, 1985), d'autres, tout en ne niant pas l'existence de ce mécanisme, ont encore récemment contesté son rôle et fait à nouveau appel à des phénomènes de convection (RAY et al., 1983; PRESTRUD-ANDERSON, 1988) pour expliquer les polygones et les cercles triés.

Dans un autre domaine, celui de la conjugaison entre cryoexpulsion et cryoreptation, on constate que les objets (barres, plaques) cryoexpulsés se sont couchés sur la surface du sol et ont ensuite rampé lentement à sa surface. Lorsque le grand axe de l'objet était dès le départ conforme à la ligne de plus grande pente, la position restait conservée tout au long de la reptation; par contre, lorsque ce grand axe formait initialement un angle avec la ligne de grande pente, l'élément a subi dans presque tous les cas une rotation progressive, l'alignant petit à petit avec celle-ci. Ce type de comportement des objets allongés avait déjà été mis en évidence en milieu boueux lors d'une précédente expérience (HELLUIN et al. 1979), dont le but était de cerner les modalités de mise en place des blocs dans les dépôts périglaciaires de type head. Dans ces dépôts, bien représentés sur tous les massifs anciens de l'Europe occidentale, les blocs de forme allongée ont presque toujours leur grands axes conforme à celui de la pente (WATSON et WATSON, 1970) pratiquement depuis la zone d'alimentation en blocs. Cette orientation préférentielle correspond en fait à la résistance minimale à l'écoulement (VAN VLIET-LANOË, 1988), aussi bien en milieu plastique qu'en milieu fluide.

Plus complexe a été le comportement d'une des séries de plaques posées de chant (fig. 4). Elles aussi ont subi l'action combinée de la cryoexpulsion et de cryoreptation, avec parfois un mouvement de rotation tendant à les orienter conformément à la pente, mais elles n'ont pas été totalement expulsées du sol et mises à plat à la surface de ce dernier. Il apparaît que le gonflement important du limon pendant le gel et la naissance de bourrelets de poussée entre elles les a maintenues dans une position oblique, relevante par rapport à la pente, position qui s'est conservée malgré le mouvement de cryoreptation. Ceci est intéressant également car la position relevante est classique dans les dépôts périglaciaires où des blocs ont migré dans des matrices fines gélives: heads, apports par coulées de gélifluxion. Selon VAN VLIET-LANOË (1988), la position relevante se conserve bien lorsque l'alimentation en eau du versant est bonne mais sans qu'il y ait saturation et que l'intensité du gel est assez importante. La ségrégation de glace est plus forte à l'aval des objets qui est plus proche de la surface du sol qu'à l'amont, enfoui plus profondément, ce qui entretient une certaine obliquité. Cependant, le mécanisme dominant est la résultante entre

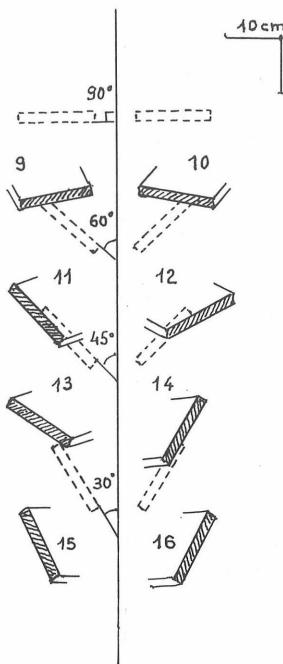


Fig. 5 — Évolution des plaques posées de chant: pointillés: position initiale, trait plein: position finale

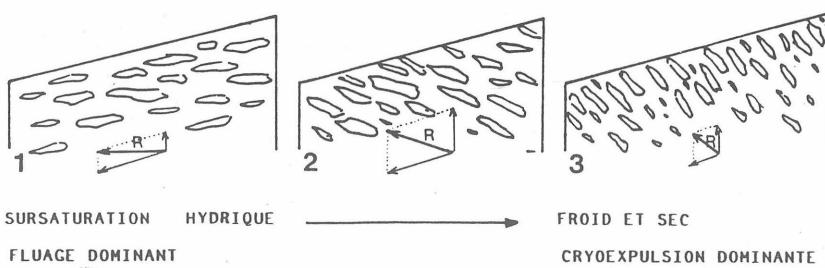
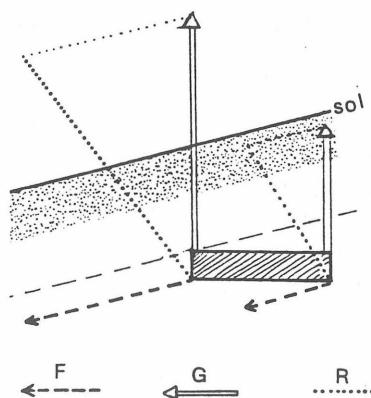


Fig. 6 — Position des blocs dans les heads en relation avec le gonflement cryogénique et l'alimentation hydrique. F, fluage — G, gonflement cryogénique — R, résultante (d'après B. Van Vliet-Lanoë, 1988)

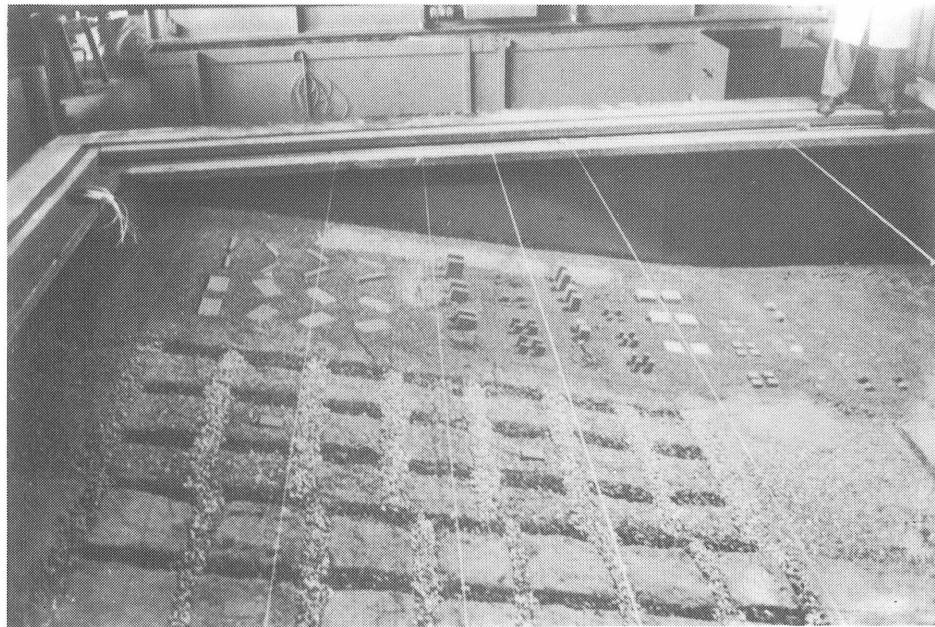


Photo 1. La cuve d'expérimentation (au second plan, l'essai de cryoexpulsion et cryoreptation)

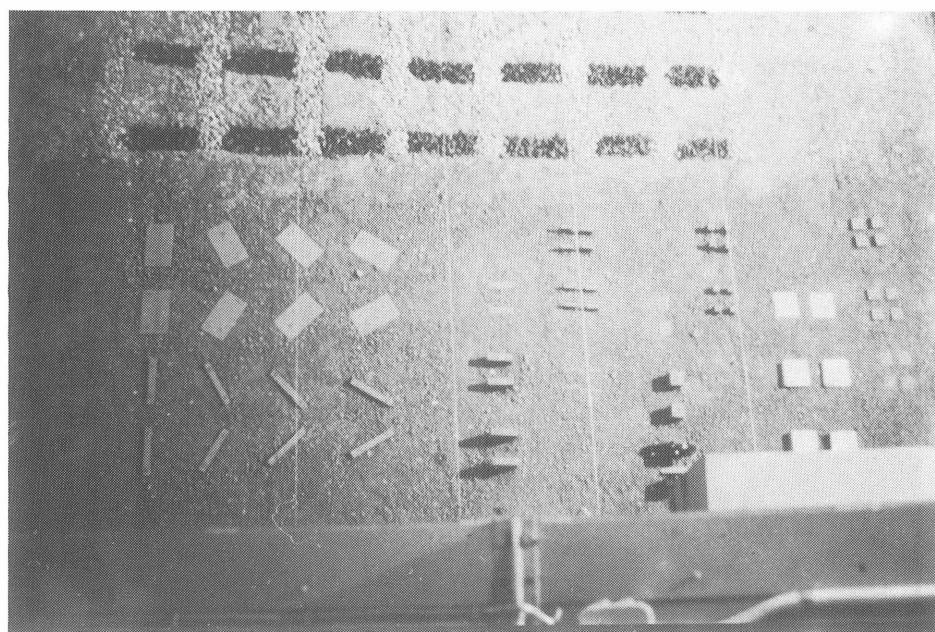


Photo 2. Les plaques, barres, cubes soumis à la cryoexpulsion



Photo 4. Cryoexpulsion des plaques. Situation à la fin du 7^{ème} cycle gel-dégel

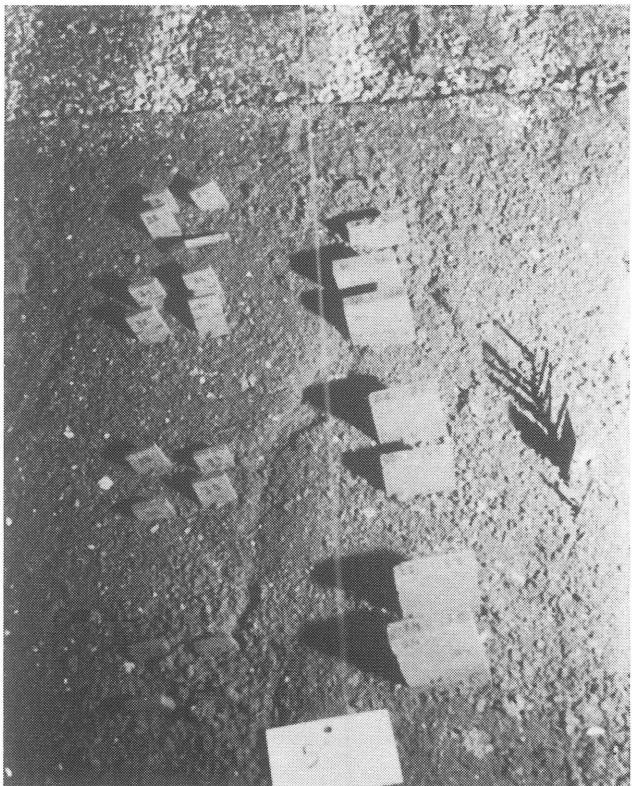


Photo 3. Cryoexpulsion des plaques $18 \times 8 \times 2$ et $9 \times 4 \times 1$ m.
Situation à la fin du 5^{ème} cycle gel-dégel

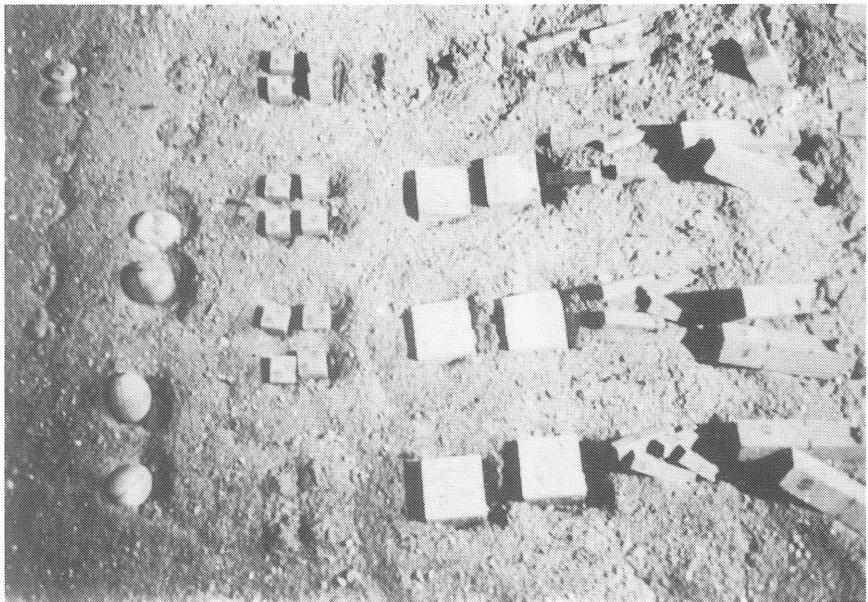
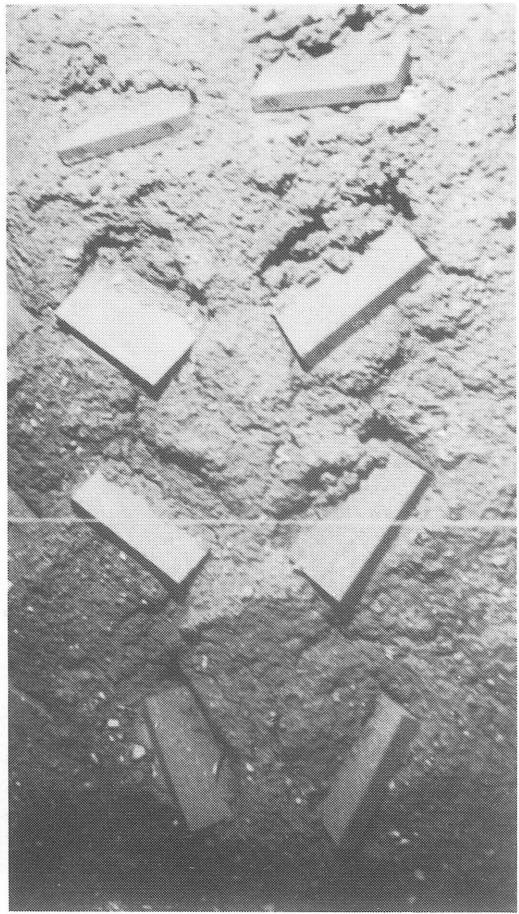
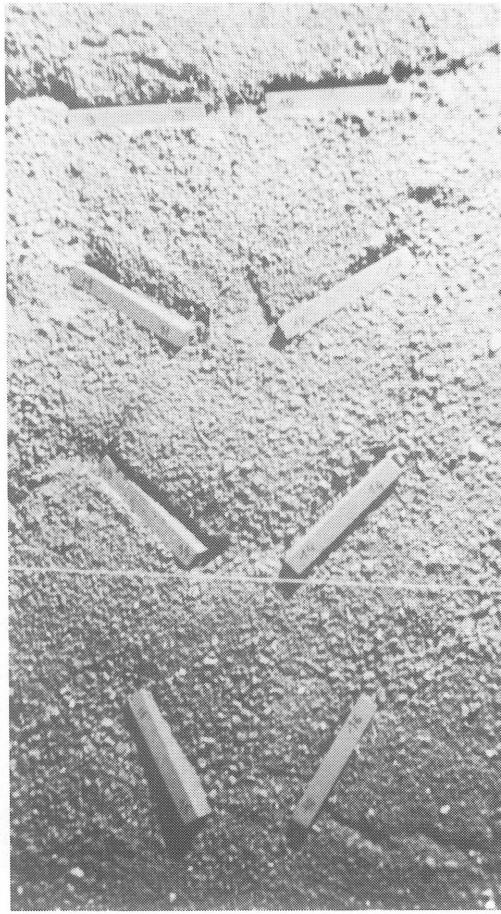


Photo 5. Cryoexpulsion des barres. Mouvements divers des cubes et des galets



Photo 6. Cryoreptation de plaques. Noter les bourrelets à l'aval des plaques



Photos 7, 8, 9. Cryoexpulsion de plaques posées de chant. Situations au 4^{ème}, 7^{ème} et 12^{ème} cycles. La position relevante avec bourrelets à l'aval des plaques sera conservée jusqu'à la fin de l'essai

l'intensité de la traction lors du gel et de la cryoreptation ou de la gélifluxion lors du dégel (*ibidem*, 1988). Si le sédiment reste gorgé d'eau (instabilité structurale favorisant la liquéfaction, présence de névé) au dégel, le mouvement (fig. 6) vers l'aval dominera et l'objet allongé sera sub-parallèle à la pente. Si par contre, comme dans le cas de notre expérience, le drainage est effectif lors de la fonte, les objets resteront relevants aussi bien en surface — cas de cette expérience — qu'en profondeur. C'est ce que nous avons pu constater en profondeur dans le matériel limono-graveleux d'une troisième expérience menée conjointement et dont une grande partie de résultats a déjà fait l'objet d'une publication (COUTARD et al. 1988).

CONCLUSION

Les résultats acquis au cours de l'expérience permettent de mieux comprendre les positions caractéristiques adoptées par les grandes pierres prises dans des matrices gélives soumises à des cycles gel-dégel répétés. Le rôle de la cryoexpulsion et de la cryoreptation ainsi que ceux de la forme et de la position originelle des objets sont bien mis en évidence. La cryoexpulsion différentielle explique l'organisation des dallages nivaux et aussi pourquoi les grandes dalles de roche sont très souvent en nette saillies à la surface des formations superficielles en milieu alpin ou arctique. La combinaison cryoexpulsion-cryoreptation conduit petit à petit à une position relevante des éléments pris dans une matrice fine, le grand axe de ceux-ci s'orientant conformément à la pente comme nous pouvons l'observer fréquemment dans les formations de pente périglaciaires de l'Europe occidentale.

Bibliographie

- BESKOW, G., 1935 — Tjälbildningen och tjälfyntingen med särskild hänsyn till vägar och järnvägar. *Sveriges Geologiska Undersökning, Arsbok* **26**, (3), 242 p.
- BURROUS C. M., 1977 — Experimental up-freezing of objects: effects of object geometry. Univ. Washington, Quaternary Res. Center. Unpublished Master thesis.
- COUTARD J. P., VAN VLIET-LANOË B. and AUZET A. V., 1988 — Frost heaving and frost creep on an experimental slope: results from soil structures and sorted stripes. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N. F., suppl. Bd. (71), p. 13—23.
- HELLUIN M., COUTARD J. P., HELLUIN-QUINJEURE E. et OZOUF J. C., 1979 — Vérification expérimentale d'une hypothèse de mise en mouvement de blocs sur une pente soumise à des alternances gel-dégel. *Bull. Centre de Géomorphologie du CNRS*, Caen, (24), 165—176.
- HÖGBÖM B., 1910 — Einige Illustrationes zu den geologischen Wirkungen des Frostes auf Spitsbergen. *Geol. Inst. Bull. Univ. Upsälä*, (9), 41—59.
- KAPLAR C. W., 1965 — Stone migration by freezing of soil. *Science*, (149), 1520—1521.
- LAUTRIDOU J. P. et COLLAB. 1984 — 25^{ème} Congrès International de Géographie, Paris-Alpes, Symposium pré-congrès n° 12. „La signification des phénomènes périglaciaires“. Livret-guide de l'excursion Alpes Françaises, sous la direction de J. P. Lautridou, public. offset Centre de Géomorphologie du CNRS, Caen, 184 p.
- MACKAY J. R., 1984 — The frost heave of stones in the active layer above permafrost with downward and upward freezing. *Arctic and Alpine Research*, **16**, (4), 439—446.
- MORAWETZ S., 1932 — Beobachtungen an Schutthalden, Schuttkegeln und Schuttflecken. *Zeitschrift für Geomorphologie*, **7**, (3), 25—43.
- PENNER E., 1974 — Uplift forces on foundations in frostheaving soils. *Canadian Geotechnical Journal*, **11**, (3), 323—338.
- PISSART A., 1969 — Le mécanisme périglaciaire dressant les pierres dans le sol. Résultats d'expériences. *C. R. Acad. Sci., Paris*, **268**, 3015—3017.

- PISSART A., 1977 — Apparition et évolution des sols structuraux périglaciaires de haute montagne. Expériences de terrain au Chambevrion. In: „Formen, Formengesellschaften und Untergrenzen in den heutigen periglazialen Höhenstreifen der Hochgebirge Europas und Afrikas zwischen Arktis und Aquator, (Ed. H. Poser). *Abh. der Akad. der Wissenschaften in Göttingen, Mat-Phys. Klasse*, (31), 142—156.
- PRESTRUD-ANDERSON S., 1988 — Upfreezing in sorted circles, Western Spitsbergen. V Internat. Conf. on Permafrost, Trondheim, Norway, August 1988. Proceed., Vol. 1, Tapir Publ., Trondheim, 666—671.
- RAY R. J., KRANTZ W. B., CAINE T. N. and GUNN R. D., 1983 — A mathematical model for patterned ground: sorted polygons and stripes and underwater polygons. IV Internat. Conf. on Permafrost, Fairbanks, July 1983, Proceed. National Acad. Press, Washington D. C., 1036—1041.
- VAN VLIET-LANOË B. 1985 — Frost effects in soils. In: Soil and Quaternary Landscape Evolution. J. Boardman editor, J. Wiley Publ. 115—156.
- VAN VLIET-LANOË B. 1988 — Le rôle de la glace de ségrégation dans les formations superficielles de l'Europe de l'Ouest. Processus et héritages. Thèse de Doctorat d'Etat, Géomorphologie, Université de Paris I-Sorbonne, 1987, public. Editec Caen, 854 p.
- VAN VLIET-LANOË B., DUPAS A. et COUTARD J. P., 1985 — Soulèvement cryogénique de petites pierres par la glace en lentilles. Rôle initiateur de la cryodessication. *Bulletin du Centre de Géomorphologie du CNRS*, Caen, (30), 77—84.
- WASHBURN A., 1956 — Classification of patterned ground and review of suggested origins. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **67**, 823—865.
- WATSON E. and WATSON S., 1970 — The coastal periglacial deposits of the Cotentin peninsula. *Inst. Brit. Geogr. Trans. Paper*, **49**, 125—144.