

- l'aspect des versants : dans les conditions climatiques actuelles, le versant est très irrégulier et déchiqueté. Mais de loin en loin, des restes de versant "primitif" indiquent qu'avant l'établissement des conditions actuelles (climat tempéré humide, déblaiement de la base des coulées par la mer), ce versant s'avancait plus loin en mer, et surtout qu'il était régularisé par des processus et dépôts périglaciaires.

COLLOQUE INTERNATIONAL DE GEOMORPHOLOGIE

LIEGE - CAEN 1971

Communication à Caen n° 1

VARIATIONS DE VOLUME DE SOLS GELES SUBISSANT DES
FLUCTUATIONS DE TEMPERATURE SOUS 0° C

par

A. PISSART, Université de Liège

RESUME

I - Lorsque la température est abaissée au sein d'un sol contenant de l'eau, des mouvements accompagnent non seulement le franchissement du seuil de 0° C, mais aussi les fluctuations de température se produisant à des températures inférieures. Ces mouvements ont été observés au moyen :

- a) de jauges de pression immergées au sein du sol.
- b) de mesureurs de déplacement enregistrant le soulèvement du sol.
- c) de jauges de contrainte plongées dans le sol.
- d) d'aiguilles enfoncées partiellement dans le sol et dont les mouvements ont été photographiés.

II - Des expériences dilatométriques montrent que ces mouvements résultent des variations de volume qui affectent les échantillons étudiés lorsqu'ils subissent des fluctuations de température sous 0° C. Ces variations de volume ne proviennent pas seulement de la transformation d'eau en glace I et du phénomène de fusion inverse, mais encore d'autres phénomènes que nous ne pouvons définir maintenant.

Des expériences calorimétriques jumelées à des expériences dilatométriques sont actuellement en cours de préparation pour rechercher l'importance des changements de phases dans ces phénomènes.

III - Les variations de volume décrites montrent que les sols gelés maintenus à des températures inférieures à 0° C subissent d'autres phénomènes que la simple rétraction thermique. Ces phénomènes jouent un rôle fondamental dans la formation des cryoturbations et contrôlent vraisemblablement l'apparition des fentes de gel. Par ailleurs, la congélation d'eau à une température inférieure à 0° C intervient certainement dans le mécanisme de la gélivation.

SUMMARY

I - When the temperature of a soil containing water is lowered, movements occur not only with the crossing of the 0° C threshold but also with fluctuations in temperature taking place at lower temperatures. These movements have been observed by means of :

- a) pressure transducers imbedded in the soil.
- b) displacement transducers recording the uplift of the soil.
- c) strain gauges sunk in the soil.
- d) needles partially thrust into the soil, their movements being recorded by photography.

II - Dilatometric experiments show that these movements result from changes in volume which affect samples undergoing changes in temperature below 0° C. These changes in volume are due not only to the conversion of water to ice and to phenomena of inverse melting but also to other processes which we cannot yet define.

Calorimetric experiments linked with dilatometric experiments are at present being set up to investigate the importance of changes of phase in these phenomena.

III - The changes in volume described show that, where the temperature is below 0° C, soils undergo changes other than simple thermic contraction. These phenomena play a fundamental part in the production of cryoturbation features and probably control the formation of ice wedges, while the freezing of water to temperatures below 0° C certainly plays a part in the mechanism of frost shattering.

I - LES MOUVEMENTS OBSERVÉS LORSQUE LA TEMPÉRATURE FLUCTUE SOUS 0° C

Quatre techniques différentes nous ont permis de voir que des mouvements se produisent au sein du sol gelé lorsque la température fluctue, même si les variations de température se produisent entièrement sous 0° C (1). Nous passerons successivement en revue des résultats obtenus par ces quatre techniques, à savoir l'utilisation de jauges de pression, de mesureurs de déplacement, de jauges de contrainte et la photographie de mouvements qui affectent des aiguilles partiellement enfoncées dans le sol gelé.

A) OBSERVATIONS OBTENUES AU MOYEN DE JAUGES DE PRESSION

La jauge de pression Barber Coleman utilisée se présente comme un cylindre de 8 cm de longueur et de 1,5 cm de diamètre. La base métallique du cylindre est un tympan sensible dont l'enfoncement imperceptible est proportionnel à la pression subie. La déformation de ce tympan est enregistrée par un potentiomètre raccordé à des jauges de contrainte collées sur la partie interne du tympan (2).

Cette jauge de pression a été immergée dans une masse de boue soumise à la congélation, et les variations de pression ont été enregistrées.

La figure 1 montre un exemple de courbe obtenue avec cet appareil au sein d'un bac carré de 10 cm d'épaisseur et de 50 cm de côté, rempli d'un mélange de limon éolien (90 %) et de bentonite (10 %) fortement humidifié. La jauge est enfoncée au milieu du bac, à 5 cm de profondeur. La courbe de la température à proximité de la jauge, donc à 5 cm de profondeur, est donnée sur cette figure et permet de voir les relations existant entre les "pressions" enregistrées et les variations de température.

Nous remarquons spécialement les faits suivants :

- a) aucune variation significative de pression n'est décelée tant que la jauge n'est pas prise dans le sol gelé. C'est seulement quand la jauge est prise dans un sol cimenté par la glace que des pressions importantes apparaissent.
- b) des "pressions" positives et négatives sont observées.
- c) les "pressions" positives dépassent 1,300 kg/cm² et les "pressions" négatives atteignent une valeur comparable (3).

(1) Comme nous allons le voir, ces mouvements ne peuvent être expliqués par le simple retrait thermique, car les déplacements sont trop importants et ils ne sont pas directement en relation avec les variations de température.

(2) Une jauge de pression miniature de marque Kulite a été également utilisée. Elle se présente comme un disque plat de 3 mm de diamètre et de 1 mm d'épaisseur. Comme cette jauge était mal isolée contre l'humidité, elle n'a servi que 5 jours. La courbe obtenue était identique à la courbe dessinée par la jauge Barber Coleman.

(3) Ces valeurs sont mesurées par rapport à la pression atmosphérique. Bien entendu, une dépression de 1,300 kg/cm² ne peut pas exister. Ici cependant, ce ne sont pas des pressions que nous mesurons mais un effort de traction exercé sur le tympan de la jauge. Le sol gelé adhère en effet au tympan de la jauge de pression et ce «collage» explique que puissent s'exercer des efforts de traction qui n'ont rien à voir avec la valeur du vide.

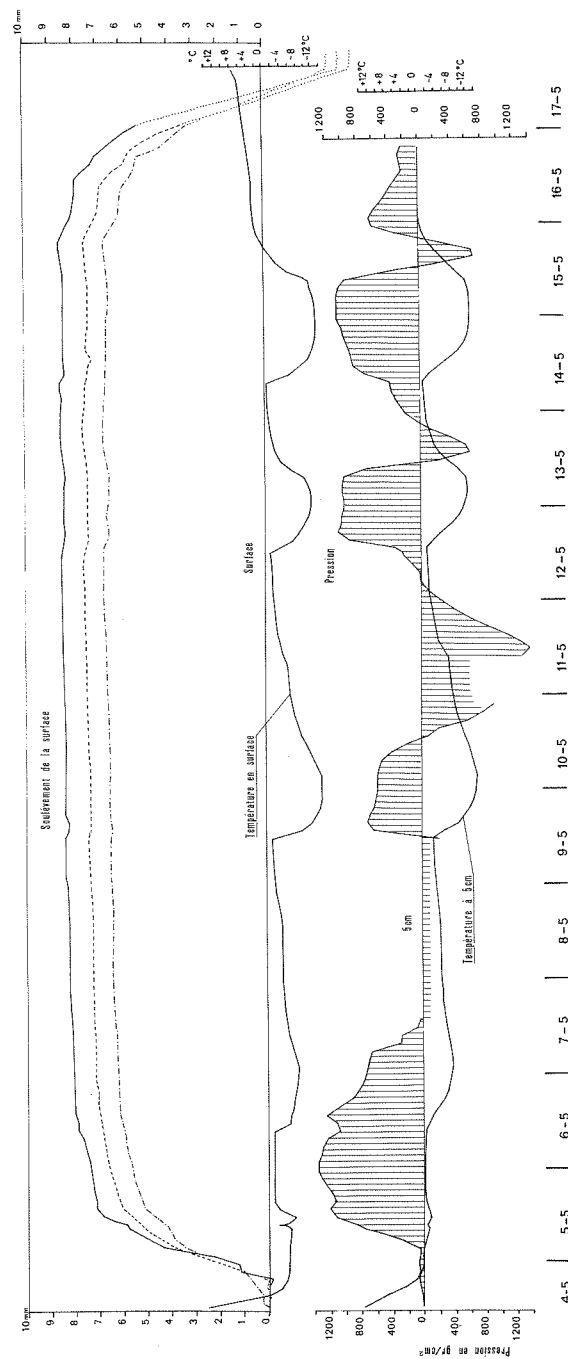


Fig. 1 : Mouvements verticaux observés à la surface et variations de pression enregistrées au sein d'un bac de limon (90 %) et de bentonite (10 %) gorgé d'eau pendant des fluctuations de température sous 0° C.

- d) ces fluctuations de "pression" sont enregistrées, alors que la température reste constamment sous 0° C.
- e) un abaissement de température de -1° C à -15° C donne le plus souvent une augmentation de "pression" suivie d'une diminution de "pression".
- f) une augmentation de température de -15° C à -1° C engendre une diminution de "pression" suivie d'une augmentation de "pression".

Nous avons déjà publié des courbes semblables, obtenues avec cet appareil (Pissart 1970, p. 41 et 42). A la suite des expériences dilatométriques que nous décrivons plus loin, nous pouvons proposer maintenant une meilleure interprétation des variations de pression enregistrées. Nous y reviendrons plus loin (paragraphe intitulé: "Les mesures dilatométriques expliquent divers mouvements observés").

B) OBSERVATIONS OBTENUES AU MOYEN DE MESUREURS DE DEPLACEMENT

Des "transducteurs déplacement" de marque Hewlett Packard ont été utilisés pour suivre les mouvements verticaux qui affectent la surface du sol sous l'action du gel. Ces appareils électroniques se présentent comme un cylindre au sein duquel coulisse une tige métallique. Le déplacement de cette tige métallique s'inscrit sur un potentiomètre enregistreur et permet de voir des déplacements aussi petits que 0,1 mm (1).

La figure 1 donne à la partie supérieure, les mouvements enregistrés par 3 "mesureurs de déplacement" au cours de la même expérience que celle dont nous avons parlé pour les variations de "pression". Ces appareils étaient alignés à la surface du bac de boue. Rappelons que celui-ci se présentait comme un bac carré de 50 cm de côté qui était rempli par 10 cm de boue.

L'examen de la courbe obtenue permet les constatations suivantes :

- a) des mouvements très considérables du sol apparaissent lorsque l'on franchit le seuil de 0° C. Les mouvements enregistrés par les différentes jauges de pression ne sont pas parallèles parce qu'en raison du dispositif expérimental, toute la surface du bac n'a pas gelé en même temps. Comme l'échantillon contenait au départ une quantité très considérable d'humidité, le soulèvement au cours du gel a presque atteint 10 mm. Au moment du dégel, l'affaissement est plus important encore. Le sol a été, en effet, compacté pendant la période de gel lors de la succion de l'eau qui est venue former des lentilles de glace de ségrégation.
- b) pendant toute la durée du gel qui s'est cependant poursuivi plus de 10 jours, la surface du sol a continué à se soulever.
- c) les mouvements de soulèvement ont été particulièrement importants au moment où la température se réchauffait et passait par exemple de -15° à -1° C.

L'existence de ces mouvements a été directement vérifiée en photographiant au cours de l'expérience la surface du sol. Ces mouvements sont beaucoup trop importants pour pouvoir être expliqués par la simple dilatation thermique. Ils résultent de variations de volume dont nous parlerons lors de la présentation des mesures dilatométriques.

(1) La compensation en température de cet appareil n'était pas parfaite. Nous avons en conséquence, établi expérimentalement l'abaque des corrections pour chaque appareil, et nous en avons tenu compte dans les résultats présentés sur la figure 1.

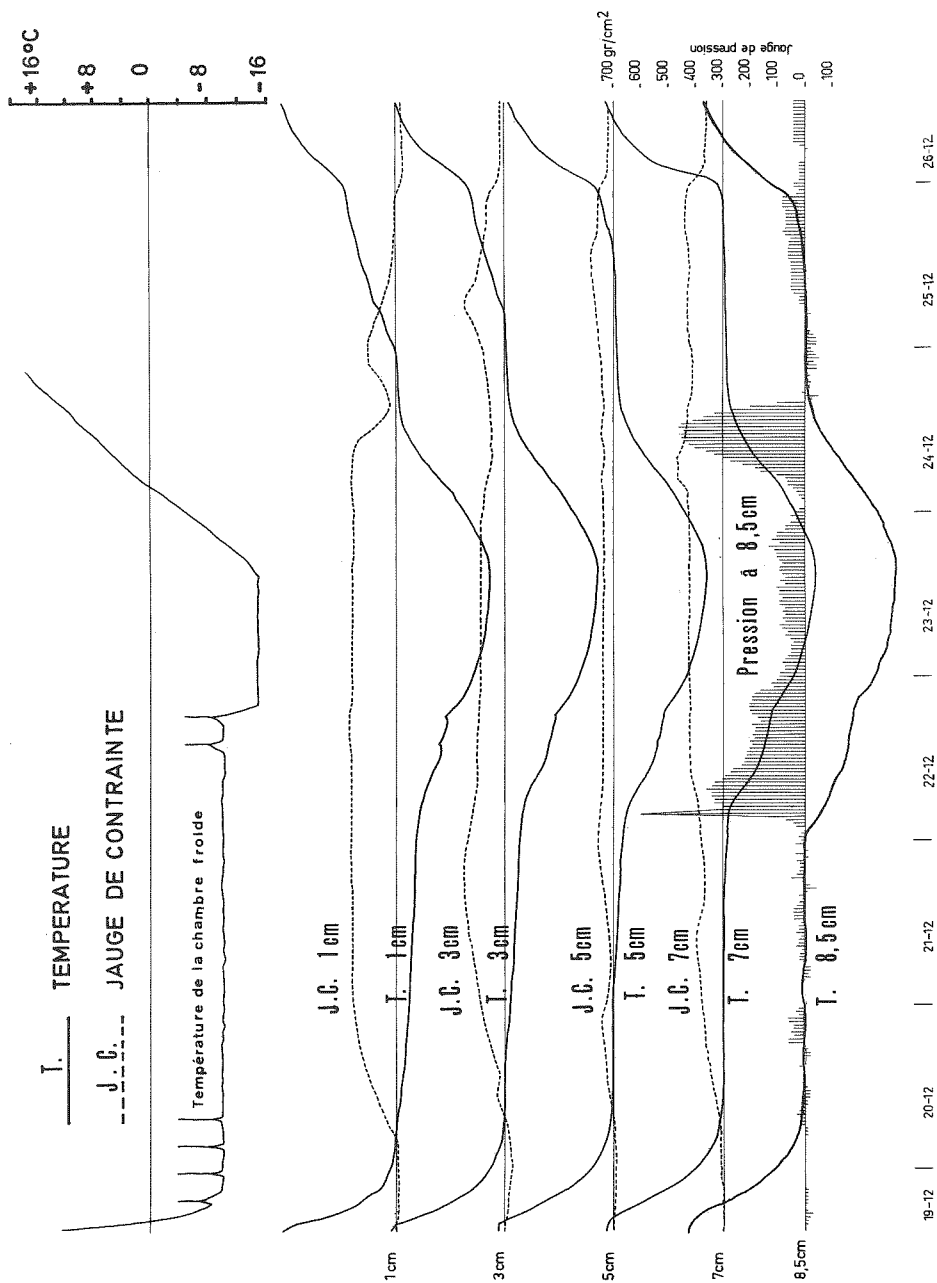


Fig. 2 : Mouvements enregistrés au moyen de jauges de contrainte et d'une jauge de pression dans un bac contenant un mélange de boue composé pour 50% de limon et 50% de bentonite. L'échelle de température donnée pour la chambre froide, à la partie supérieure de cette figure est valable pour toutes les courbes de température qui y sont représentées.

C) OBSERVATIONS OBTENUES AU MOYEN DE JAUGES DE CONTRAINTE

Afin de déceler des mouvements se produisant au sein des mêmes bacs de boue, nous avons immergé dans ceux-ci des jauges de contrainte de 10 cm et de 25 cm de longueur. Ces jauges de contrainte étaient d'abord fixées sur un support en araldite, mais la trop grande rigidité du support entraînait au dégel, la déformation de la masse de boue, par simple retour élastique de la jauge. Un nouveau support a alors été utilisé : il consiste en une lame très mince d'acier (0,2 mm) qui se plie très facilement.

Afin de compenser l'appareil de mesure pour les fluctuations de température, deux jauges de contrainte ont été collées sur les deux faces de la même lame d'acier. Le potentiomètre enregistreur auquel elles sont raccordées indique les flexions que subissent les lames d'acier et le sens de celles-ci. En effet, la flexion de la lame d'acier provoque dans un sens une différence de potentiel positive et dans l'autre sens, une différence de potentiel négative.

La figure 2 montre les déformations subies au cours d'un cycle de gel par quatre lames d'acier identiques, disposées horizontalement au sein du bac de boue (1) à 1, 3, 5 et 7 cm de profondeur. L'interprétation des courbes obtenues est délicate car il est impossible de dire si les mouvements enregistrés au potentiomètre résultent d'une flexure à large ou à court rayon de courbure, ou encore s'il ne s'agit pas de deux mouvements opposés qui s'annulent ou s'atténuent mutuellement.

Bien que les mouvements décelés par cet appareillage soient faibles, ils sont cependant assez importants pour montrer l'existence de mouvements alors que la température est bien inférieure à 0° C. Un mouvement net sur la figure 2 s'est produit lors du réchauffement alors que la température ne dépassait pas 5° C. Il s'agit ici, incontestablement, de déformations au sein de la masse de boue gelée, déformations qui peuvent être mises en relation avec les mouvements décelés par les jauges de pression et les mesureurs de déplacement. Aussi tous ces phénomènes seront-ils examinés ensemble à la lumière des résultats des expériences dilatométriques.

D) MOUVEMENTS D'AIGUILLES ENFONCEES PARTIELLEMENT DANS LE SOL GELE

Les mouvements se produisant au sein du sol gelé ont été observés également en enfonçant partiellement dans le sol des aiguilles métalliques. Sous l'action du gel, ces aiguilles subissent des mouvements qui consistent non seulement en un soulèvement vertical, mais encore en un mouvement rotationnel (PISSART, 1969 - 1970). Nous avons proposé d'expliquer ainsi les cailloux dressés qui sont fréquents dans les sols périglaciaires.

Les observations faites à l'occasion du travail publié en 1969, nous ont montré que des mouvements non négligeables affectaient des aiguilles inclinées de 45°, au moment où la température du sol gelé où elles étaient enfoncées, fluctuait sous 0° C. Nous avons alors suivi les déplacements de la partie visible des aiguilles au cours des cycles de gel, en photographiant toutes les deux heures au moyen d'un appareil photographique Robot leur position. Les prises de vue étaient réalisées automatiquement sans ouvrir les portes du frigo et, de ce fait, sans provoquer de perturbation extérieure.

La figure 3 montre les résultats obtenus au cours d'un cycle de gel/dégel dans un matériel constitué de 90% de limon éolien et de 10% de bentonite. Ce matériel est identique à celui qui a servi dans l'expérience rapportée sur la figure 1. Les aiguilles avaient une longueur de

(1) Il s'agit encore d'un mélange de limon éolien et de bentonite mais les proportions n'étaient pas les mêmes que dans l'expérience de la figure 1.

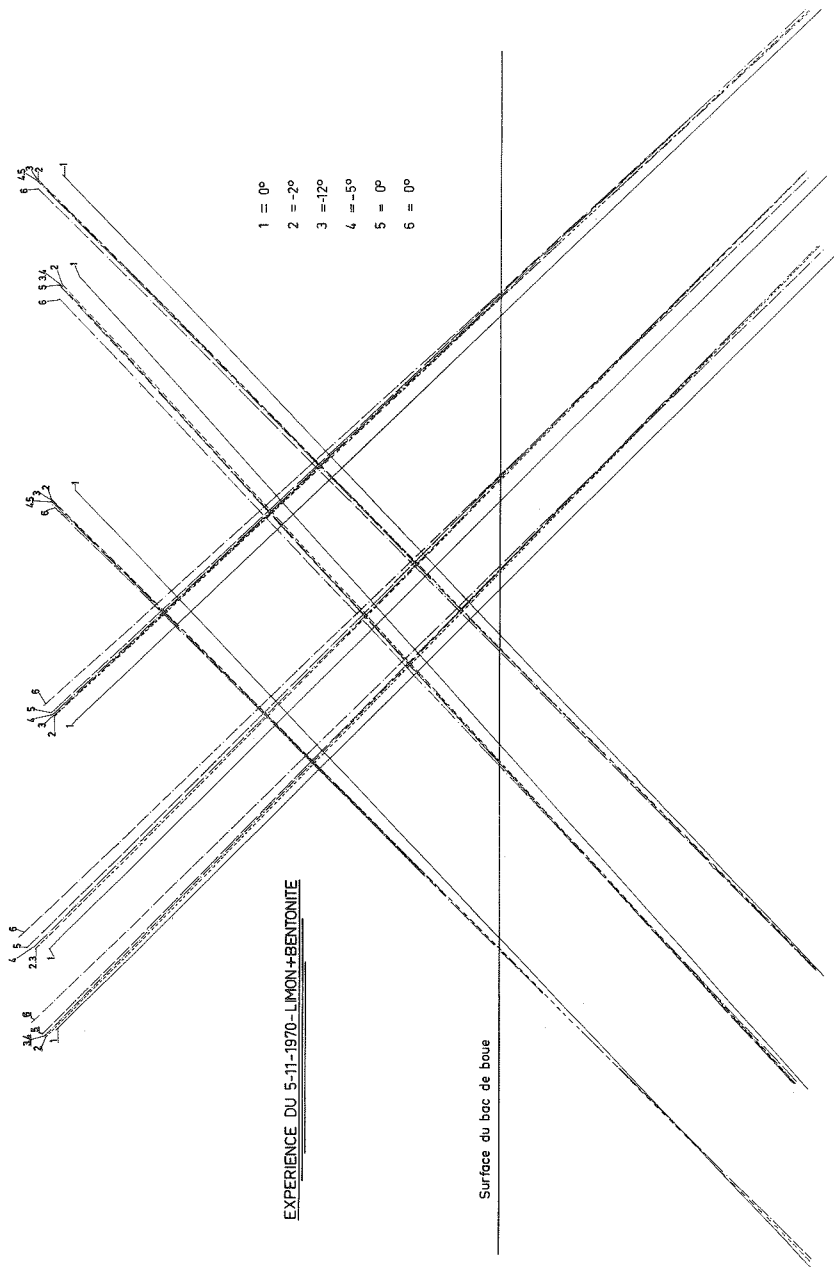


Fig. 3 : Mouvements subis par des aiguilles métalliques enfoncées dans une masse de boue subissant des fluctuations de température. Les chiffres indiquent les positions observées au cours d'un cycle de gel/dégel qui a duré 72 heures : 1. (0° C) début du gel ; 2. (-2° C) après 18 h ; 3. (-12° C) après 24 h ; 4. (-5° C) après 45 h ; 5. (0° C) après 54 h ; 6. (0° C) après 72 h.

33 cm. Les parties qui sortaient du bac de boue avaient été amincies pour éviter que, au moment du dégel, leur poids n'entraîne leur basculement.

Les faits principaux que montre cette figure sont les suivants :

- a) les mouvements les plus importants se produisent au moment où le sol passe le seuil de 0° C.
- b) des mouvements minimes mais indiscutables affectent certaines aiguilles alors que tout le bac se trouve à une température inférieure à 0° C.
- c) tous les mouvements que subissent les aiguilles tendent à leur donner une position plus redressée.

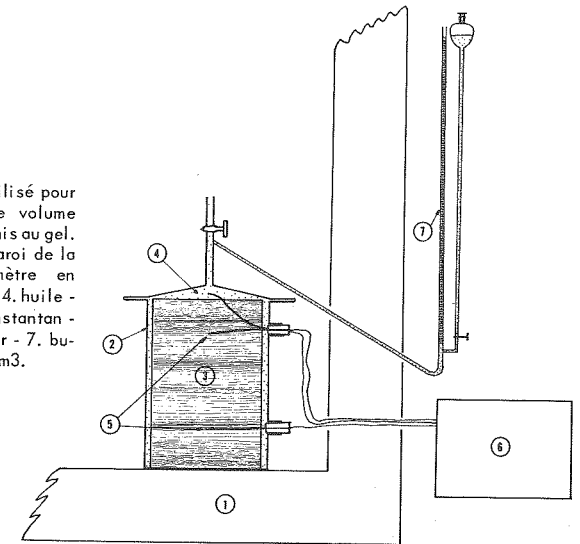
Il nous est impossible dans l'état actuel de nos travaux de dire ce qui dans les mouvements décelés résulte d'une déformation générale de la masse gelée et ce qui est dû à la présence de l'aiguille elle-même au sein du sol. Sans pousser plus loin l'analyse, cette expérience s'ajoute aux précédentes pour établir l'existence de mouvements lorsque un sol gelé subit des fluctuations de température.

II - LES MESURES DILATOMETRIQUES (1)

A) APPAREILLAGE ET RESULTATS

Les phénomènes décrits précédemment ne peuvent guère s'expliquer autrement que par des variations de volume de la masse de terre humide soumise au gel ; nous avons entrepris des mesures dilatométriques pour étudier ces variations de volume. Dans ce but, nous avons fait construire des dilatomètres en verre, se présentant comme des récipients cylindriques d'une capacité proche de 500 cm³. La température au sein de ces dilatomètres était mesurée au moyen de thermocouples Cuivre-Constantan plongés dans la masse de terre étudiée et dans le liquide remplissant le dilatomètre. Ainsi préparé, l'appareil était placé dans une chambre froide et raccordé, comme le montre la figure 4, par un mince tuyau à une burette de 10 cm³

Fig. 4: Schéma de l'appareillage utilisé pour mesurer les variations de volume d'échantillons de terre soumis au gel. Numéros de la figure : 1. paroi de la chambre froide - 2. dilatomètre en verre - 3. échantillon étudié - 4. huile - 5. thermocouples cuivre-constantan - 6. potentiomètre enregistreur - 7. burette graduée au 1/100 de cm³.



(1) Ces mesures dilatométriques et les calculs d'erreur ont été effectués par M. Gillis, assistant à l'Université de Liège, que nous remercions très vivement.

graduée au 1/100 de cm³ et disposée à l'extérieur de la chambre froide. Grâce à ce dispositif, les variations de volume se produisant au sein du dilatomètre provoquent des fluctuations du liquide dans le tube capillaire. En apportant les corrections nécessaires pour tenir compte de la dilatation du dilatomètre lui-même, et de la dilatation du liquide en fonction de la température (aussi bien au sein du dilatomètre que dans le capillaire) de très faibles variations sont mesurables. Le calcul d'erreur montre en effet que, à la température de 0° C, l'erreur est inférieure à 0,02 cm³, mais est portée à 0,05 cm³ à -10° C et à 0,08 cm³ à -20° C.

Grâce à cet appareillage, des mesures des variations de volume en fonction des variations de température sous 0° C ont été effectuées dans différents matériaux pour diverses teneurs en humidité. Dans la note préliminaire que nous présentons ici, une seule courbe dilatométrique est donnée. Elle concerne un échantillon de loess éolien non remanié, qui a été légèrement réhydraté en laboratoire. Cet échantillon avait un volume de 434,6 cm³ et contenait 125,26 cm³ d'eau. Cette humidité a été déterminée en mesurant la perte de poids d'une partie de l'échantillon après qu'elle ait séjourné 24 heures dans une étuve à 110° C.

Cet échantillon n'a pas subi un seul cycle de gel-dégel rapide mais au contraire a été maintenu à une température inférieure à 0° C pendant près de 3 semaines au cours de 3 cycles successifs de gel. Nous avons pu de la sorte comparer les résultats obtenus par dilatométrie avec ceux qui avaient été acquis précédemment, au cours de périodes de gel comparables, lorsque nous avons utilisé jauges de pression, mesureurs de déplacement, jauges de contrainte, etc.

Les résultats que donne cette courbe dilatométrique (fig. 5) peuvent être résumés comme suit :

1 - Le passage du seuil de 0° C (1) engendre une dilatation importante qui correspond incontestablement à l'apparition de glace I (2). Cette dilatation n'est pas limitée à 0° C, mais se poursuit, si la température s'abaisse jusqu'aux environs de -4° C. Ce phénomène est sans doute dû au gel d'eau capillaire. De la sorte pour l'échantillon étudié, ce n'est donc qu'à des températures inférieures à -4° C que l'abaissement de température provoque une diminution de volume.

Par ailleurs, un réchauffement au-delà de cette limite voisine de -4° C provoque de façon symétrique à ce qui est observé au moment du gel, une diminution de volume. Cela signifie clairement que, une partie au moins de la glace apparue dans l'échantillon, est maintenue sous des conditions (de pression sans doute) telles que la fusion apparait en-dessous du seuil de 0° C.

2 - Cette dilatation, ainsi que l'avait observé Bouyoucos (1917) correspond seulement à la transformation en glace I d'une partie de l'eau contenue dans l'échantillon. Dans le cas de l'expérience analysée ici, si l'on apprécie la quantité d'eau gelée en admettant que au moment du gel, l'eau du sol se dilate comme de l'eau libre se transformant en glace I, il n'y a pas eu au moment de la dilatation maximum, plus de 55 % de l'eau contenue dans l'échantillon qui aurait été gelée.

(1) La méthode utilisée ici, ne nous permet pas de suivre d'une manière continue fluctuations de volume et fluctuations de température. Pour réaliser une mesure, nous avons dû attendre, en effet, que la température soit uniforme au sein de l'échantillon étudié, ce qui nécessite plusieurs heures. La courbe que nous présentons résulte donc de la jonction de différents points qui correspondent chacun à un volume et une température observés. En conséquence, la figure ne souligne pas les phénomènes de surfusion qui se produisent au début du gel et ne montre pas le détail du phénomène de gel à proximité de 0° C.

(2) Il existe à côté de la glace ordinaire dite glace I, différents types de glace dont la densité est supérieure à celle de l'eau, mais qui n'apparaissent que sous de très fortes pressions. Il n'est pas exclu que de telles glaces denses puissent exister au sein des sols (Winterkorn 1943, p. 114).

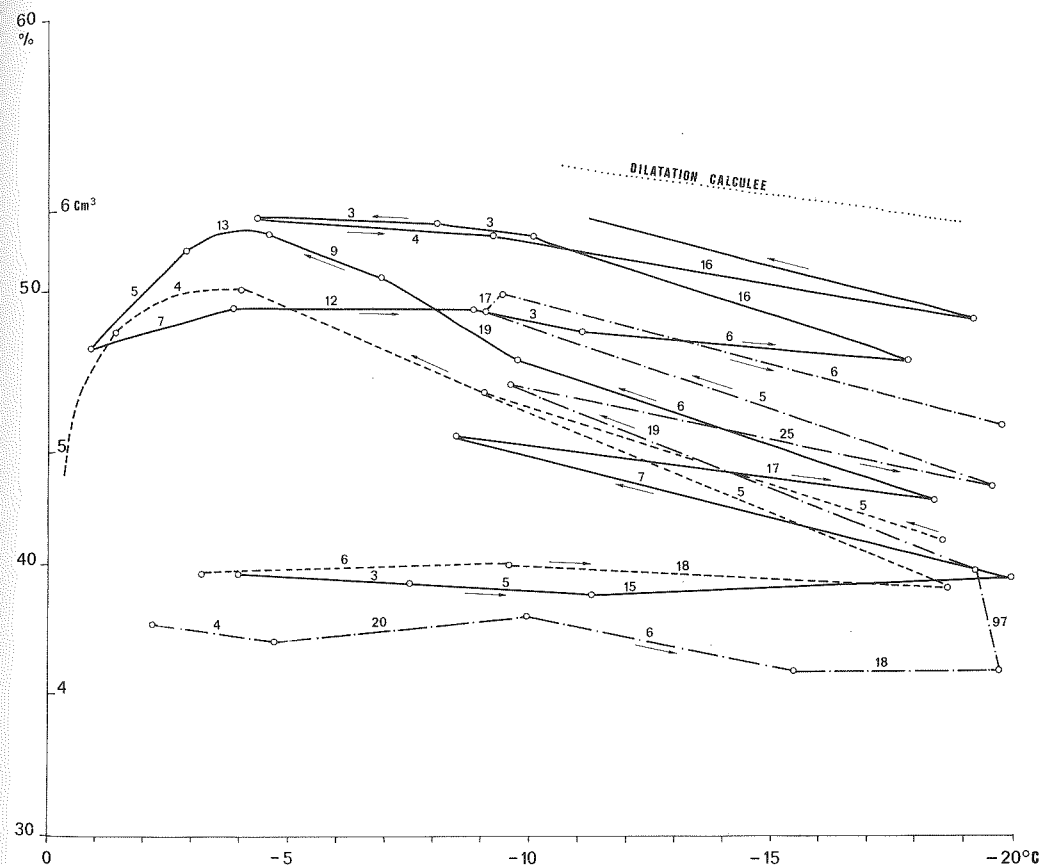


Fig. 5 : Variations de volume d'un échantillon non remanié de limon éolien de 434,6 cm³ contenant 125,26 gr d'eau et subissant des fluctuations de température sous 0° C. L'échelle de l'ordonnée a pour origine le volume de l'échantillon à la température de 0° C. La valeur absolue des variations de volume est donnée en cm³. Ces variations sont exprimées aussi en % de la quantité d'eau gelée, en prenant pour origine le volume de l'échantillon à 0° C, et pour 100 % le volume que l'on devrait trouver si toute l'eau contenue était transformée en glace I. Les chiffres indiqués en dessus de la courbe donnent le nombre d'heures qui se sont écoulées entre deux mesures successives.

3 - Un résultat plus nouveau montré par cette expérience est qu'une augmentation de volume s'est poursuivie pendant toute une semaine, alors que l'échantillon était maintenu sous 0° C. L'augmentation de volume observée est supérieure à 1,5 cm³, ce qui correspond à une dilatation de 0,35 % de la masse totale de l'échantillon soumis au gel. Cet accroissement de volume se produit sans qu'aucun apport d'eau extérieure ne soit fourni. Cette dilatation ne peut provenir que d'une apparition très lente de glace I.

4 - Même sous - 4° C, les variations de volume de l'échantillon ne sont pas contrôlées par le simple coefficient de retrait thermique. Remarquons spécialement que le premier refroidissement de - 4° C à - 20° C ne s'accompagne que d'une faible diminution de volume, tandis que le réchauffement de - 20° C à - 4° C provoque une augmentation de volume considérable. C'est donc surtout au cours des réchauffements que de l'eau du sol parait se transformer en glace I. Il est prématuré de vouloir expliquer actuellement les caractéristiques de cette partie de la courbe. Il n'est pas exclu que l'apparition de glace dense y joue un rôle. Nous espérons parvenir à une meilleure interprétation en multipliant les mesures dans divers échantillons, et en effectuant des essais calorimétriques.

B) LES MESURES DILATOMÉTRIQUES EXPLIQUENT DIVERS MOUVEMENTS OBSERVÉS

Les courbes dilatométriques permettent d'expliquer directement les mouvements observés par les jauges de pression et les mesureurs de déplacement. Elles rendent compte de certains mouvements qui ont été reconnus au moyen des photographies des aiguilles inclinées et au moyen des jauges de contrainte.

En ce qui concerne les mesures de «pression» il faut se rappeler tout d'abord que la jauge de pression est prise dans un sol gelé, rigide, et donc qu'elle n'enregistre pas des variations de pression hydrostatique, mais des efforts de poussée affectant le tympan de la jauge. Lorsque la température varie, ce ne sont pas simplement les variations de volume du milieu où la jauge est immergée qui sont mesurées, mais les relations existant entre les variations de volume du milieu et les variations de volume de la jauge qui possède son propre coefficient de dilatation thermique. C'est ainsi qu'une diminution de volume du sol gelé accompagnant un abaissement de la température ne sera enregistrée comme une diminution de pression que si cette diminution de volume est plus importante que celle de la jauge (retrait thermique). Si par contre, la diminution de volume est moindre que celle de la jauge, le potentiomètre indiquera une augmentation de pression.

En retenant ces données, il est facile de passer des courbes de "pression" aux courbes dilatométriques. L'augmentation rapide de "pression" au début du gel résulte de la congélation d'eau capillaire qui se transforme en glace à des températures inférieures à 0° C en provoquant une augmentation importante du volume de l'échantillon. La chute de "pression" qui lui succède s'explique par la diminution de volume que montre la courbe dilatométrique lorsque la température s'abaisse plus encore. Au cours du réchauffement, les phénomènes se succèdent en ordre inverse, le passage d'une variation positive à une variation négative de "pression" se produisant aux environs de - 4° C, en concordance avec les mesures dilatométriques. Le phénomène ne se présente généralement pas d'une manière absolument symétrique à ce qui a été observé au moment du refroidissement. Des déformations plastiques se produisent en effet vraisemblablement au sein de l'échantillon du moins lorsque les variations de volume rencontrent un obstacle comme celui qui constitue la présence de la jauge au sein de la masse gelée.

Les variations de niveau de la surface des bacs de boue telles qu'elles ont été observées avec des mesureurs de déplacement (fig. 1) sont également expliquées d'une manière satisfaisante par les mesures dilatométriques effectuées. Le soulèvement considérable au début du gel résulte de la dilatation importante produite par la congélation de l'eau libre, puis de l'eau capillaire. Le soulèvement progressif observé pendant plus de 10 jours (fig. 1) correspond à l'augmentation progressive de volume que montrent les mesures dilatométriques. Quant aux soulèvements si énigmatiques qui se produisent lors du réchauffement, ils correspondent à des augmentations très marquées de volume observées au même moment dans les dilatomètres. En réalité donc, les mesures de soulèvement de la surface donnent les mêmes renseignements que les mesures dilatométriques mais une précision beaucoup plus faible.

Les déplacements des aiguilles observés photographiquement (fig. 2) sont en partie seulement expliqués par les variations de volume observées. On trouve bien au début du gel un soulèvement important des aiguilles qui correspond à une importante dilatation, mais par la suite les mouvements ne sont pas directement expliqués par les variations de volume. Nous ne comprenons pas surtout, que le redressement de l'aiguille se poursuive alors que l'échantillon restant à 0° C, est en cours de dégel.

Nous ne nous hasarderons pas à expliquer non plus les mouvements des jauges de contrainte donnés à la figure 2. Ces mesures montrent l'existence de mouvements dont l'interprétation est encore trop hypothétique. Signalons seulement que le gel a pu ne pas pénétrer tout à fait horizontalement dans le bac de boue et qu'il y a là une difficulté d'interprétation importante.

Il est évident toutefois, que les variations de volume décelées par les mesures dilatométriques dans des échantillons déjà gelés, sont susceptibles d'occasionner des phénomènes divers dans les sols ; les différentes techniques que nous avons utilisées le montrent clairement.

III - IMPLICATIONS GEOMORPHOLOGIQUES

Les observations que nous venons de présenter montrent des phénomènes dont il n'a pas été tenu compte jusqu'à présent en géomorphologie. Cependant, ils jouent incontestablement un rôle dans divers phénomènes périglaciaires. Nous soulignerons spécialement leur importance dans la formation des cryoturbations et des fentes de gel, ainsi que dans le mécanisme de la gélivation.

Nous parlerons tout d'abord des cryoturbations. A ce sujet, soulignons spécialement l'augmentation de volume de 0,35 % qui s'est produite en une semaine alors que l'échantillon était maintenu à des températures inférieures à 0° C et consolidé par de la glace. Si une dilatation semblable ne se produit pas d'une manière uniforme dans le sol (par exemple parce qu'il est constitué de parties granulométriques différentes, n'ayant pas les mêmes courbes de dilatation), des tensions puis des déformations plastiques doivent apparaître. Celles-ci doivent se produire lors de chaque gel et, bien que minimes chaque fois, elles peuvent s'accroître peu à peu. La dilatation entre 0 et - 4° C doit jouer exactement le même rôle pour autant qu'elle se produise dans un milieu cimenté par de la glace. Son influence est peut-être plus considérable encore vu la quantité d'eau plus grande qui est concernée. Pour comprendre parfaitement des cryoturbations dues à ce mécanisme, il conviendrait de disposer des courbes dilatométriques se rapportant à ces matériaux et d'en connaître également les caractéristiques rhéologiques. Les déformations dont nous venons de parler ont dû en effet jouer toujours dans le sens des mouvements les plus faciles, soit vers le haut, soit vers le bas. Au total, ces mesures dila-

tométriques cadrent parfaitement avec l'hypothèse que nous avons proposée précédemment (A. PISSART, 1970, p. 45) pour expliquer les cryoturbations, hypothèse selon laquelle, ces structures peuvent apparaître indépendamment de l'existence d'un pergélisol.

A propos des fentes de gel, cette expérience montre qu'un retrait thermique ne se produit pas dès que la température descend sous 0° C, mais qu'elle peut seulement s'effectuer à une température plus basse (inférieure à - 4° C, dans le cas de l'échantillon considéré). La dilatation constante se produisant pendant plus d'une semaine semble vouloir dire que les fentes de gel ne peuvent pas s'ouvrir lors des premiers froids. Cette courbe montre, en outre, que le retrait du sol lorsque la température s'abaisse n'est pas contrôlé uniquement par le coefficient de retrait thermique. D'autres facteurs interviennent certainement, du moins pendant les premières semaines de gel (1).

Nous ne voudrions pas terminer cet article sans étendre nos conclusions au mécanisme de la gélivation. Dans la majorité des écrits, le seuil de température qui contrôle la gélivation est le passage de 0° C, du moins si l'on omet les phénomènes de surfusion. Nous venons de montrer que dans les sols, ce seuil de 0° C n'est pas la seule température où se produit la congélation de l'eau. Au sein d'un sol fin, une quantité d'eau importante tenue fortement par des forces capillaires ou autres, gèle à des températures plus basses. Ainsi que nous l'avons déjà proposé (A. PISSART, 1970, p. 45) l'eau contenue dans les roches et responsable de la gélivation est sans doute tenue par des forces capillaires sous des pressions considérables. De ce fait, cette eau gèlerait à des températures inférieures à 0° C. Ce serait le gel de cette eau dans des pores dont les conduits vers l'extérieur sont cimentés par de la glace apparue à des températures plus élevées qui permettrait la production d'efforts susceptibles de rompre les roches.

Des études combinées de gélivation et de diamètre des pores au moyen d'un porosimètre à mercure (R. GERARD, 1969, p. 15) ont montré que les échantillons présentant un diamètre des pores correspondant à 10 % de la porosité ouverte plus petit que 2 microns ne résistait pas au gel. Or, c'est précisément pour des pores un peu plus petits que 2 microns, que la pression de l'eau qui y est contenue s'élève d'une manière importante, et donc que la température de congélation s'abaisse. Ainsi s'expliquerait le rôle de l'intensité du gel dans la gélivation, rôle que Potts (1970) a signalé à la suite d'études expérimentales.

(1) Des expériences de plus longue durée sont nécessaires pour voir si le coefficient de retrait thermique n'entre pas seul en jeu après un très long gel. On peut s'attendre à ce résultat si la température reste assez basse (dans ce cas-ci, inférieure à - 4° C).

BIBLIOGRAPHIE

- PISSART A. 1970. Les phénomènes physiques liés au gel, les structures périglaciaires qui en résultent et leur signification climatique. Ann. Soc. Geol. Belg. 93, 7 - 49.
- GERARD R. 1969. Détermination de la résistance au gel des matériaux de construction par la pométrie au mercure. Publication du Centre Scientifique et Technique de la Construction, 1, 6 - 15, rue du Lombard, 41, Bruxelles 1.
- PISSART A. 1969. Le mécanisme périglaciaire dressant les pierres dans le sol. Résultats d'expériences. C. R. Acad. Sc. Paris, 268, 3015 - 3017.
- POTTS A. S. 1970. Frost action in rocks : some experimental data. Transaction Institute of British Geographers, 49, 109 - 124.
- BOUYOCOS G. F. 1917. Measurement of the inactive or unfree moisture in the soil by means of the dilatometer method. Journ. of Agricult. Research, VIII, 6 195 - 217.
- WINTERKORN H. F. 1943. The condition of water in porous systems Soil Science, 56, 109 - 115.

DISCUSSION

Intervention de M. AGUIRRE - PUENTE :

Bien que le dégel des sols fins humides n'ait pas été particulièrement étudié dans notre laboratoire, je voudrais signaler que nous avons aussi constaté que certains sols pouvaient gonfler pendant le dégel. Nous n'avons pas étudié ce phénomène mais nous pensons qu'il pourrait être le résultat d'une sorte de relaxation du sol pendant le dégel si le gel a été effectué très rapidement.

En effet, dans ce cas, le potentiel de succion apparaissant au voisinage du front de congélation ne peut avoir le temps de faire ses effets (écoulement, alimentation de la glace ségréguée) au cours du processus de gel et ceux-ci se manifestent alors pendant le dégel sous la forme d'un léger gonflement.