

CONTRIBUTION EXPÉRIMENTALE A LA CONNAISSANCE DE LA GENÈSE DES SOLS POLYGONAUX

(5 figures dans le texte, 2 hors-texte)

par A. PISSART

Chef de Travaux à l'Université de Liège

RÉSUMÉ

Des expériences de laboratoire ont montré l'apparition d'un réseau polygonal de dessiccation, dans des bacs de boue soumis à un gel très lent. Le réseau polygonal apparaît en profondeur, à la suite de la migration de l'eau vers la partie supérieure du sol où se forment d'importantes lentilles de glace de ségrégation. La dimension de ces polygones est déterminée à la fois par l'épaisseur de la couche qui subit le retrait, par sa nature et par la vitesse de pénétration du gel.

INTRODUCTION

Depuis plus de trois ans, nous tentons, expérimentalement au laboratoire de géographie physique de l'Université de Liège, de reproduire des sols polygonaux. Nous nous efforçons de faire apparaître des structures polygonales dans des bacs de boue mélangée à des cailloux, soumis à des alternances de gel et de dégel. Nous cherchons ensuite à reconnaître les processus qui se sont exercés.

L'article que nous présentons ici n'a pas pour but de donner tous les résultats auxquels nous sommes dès à présent arrivés, mais seulement de prendre date en exposant un processus que nous avons mis en évidence, processus dont le rôle nous paraît fondamental dans l'apparition des sols polygonaux périglaciaires.

(*) Nous remercions très vivement Messieurs les Professeurs P. Macar qui nous a encouragé et conseillé au cours de ce travail, et A. Cailleux qui a eu la bienveillance de relire notre manuscrit.

ENCODÉ

16 FEB 1989

Rappelons que plusieurs dizaines d'hypothèses différentes (*) ont été avancées pour expliquer la genèse de ces formes. Aucune, toutefois, ne paraît entièrement satisfaisante et l'opposition des théories en présence suscite une controverse qui continuera à faire couler de l'encre, sans doute jusqu'au jour où l'une d'elle aura reçu une confirmation expérimentale.

Tous les articles récents défendent l'opinion que plusieurs processus se complètent pour façonner les sols polygonaux. Nous sommes également de cet avis et nous pensons que le processus de dessiccation dû au gel, que nous présentons ici, ne peut à lui seul expliquer l'origine des formes polygonales périglaciaires.

LE PROCESSUS OBSERVÉ

La photo 1 montre le fond d'un bac rempli de boue sur une épaisseur de 10 cm et dont la partie supérieure a subi un refroidissement très lent. Tandis que la surface se congelait sans montrer pratiquement de modification d'aspect, la partie inférieure se découpait en un réseau polygonal de fissures de retrait bien visibles sur la photo. Ces fissures de retrait résultent de la dessiccation. Elles sont nées à la suite de la migration de l'eau vers la partie supérieure du sol, où sont apparues des lentilles de glace de ségrégation. La photo 2 montre en coupe le phénomène puisque l'on peut y voir les lentilles de glace qui surmontent le sol asséché où une fissure de dessiccation (F) est apparue.

La formation d'une telle polygonation sous l'influence unique du gel est ainsi démontrée. Elle constitue sans doute l'explication de l'origine première de certains sols polygonaux qui apparaissent en des endroits extrêmement humides, où la dessiccation aérienne ne semble jouer aucun rôle.

Pour la compréhension du phénomène, nous rappellerons ci-dessous l'explication du mécanisme de la migration de l'eau dans les sols soumis au gel, ainsi que celle du retrait par dessiccation.

* * *

(*) Voir notamment l'article de A. L. Washburn (1956) qui a résumé les principales théories émises et a précisé les objections que suscitait chacune d'elle.

LA MIGRATION DE L'EAU DANS LE SOL SOUS L'EFFET DU GEL :

La migration de l'eau vers la surface est directement observable lorsque se forment des pipkrakes. Ne voit-on pas en effet, sous l'influence d'une brusque gelée, des lentilles de glace apparaître à la surface du sol et s'accroître progressivement par leur base? Le même phénomène, mais se produisant cette fois-ci en profondeur, conditionne le soulèvement du sol lors du gel et la sursaturation en eau de sa partie supérieure au dégel. Ce dernier résultat entraîne la dégradation spectaculaire des routes en périodes de dégel.

Depuis que Taber, en 1929, a établi clairement que le soulèvement du sol par le gel était dû à la formation de lentilles de glace de ségrégation, les ingénieurs se sont longuement penchés sur ce problème. La bibliographie des ouvrages techniques se rapportant à cette question est presque aussi importante que celle concernant les sols polygonaux eux-mêmes. Il a été établi ainsi, dès le début, que cette migration de l'eau se produisait seulement lorsque la pénétration du gel était lente, qu'elle affectait un sol suffisamment humide et contenant au moins 1 % de grains plus petits que 0,02 mm (Casagrande 1931).

Les multiples aspects de ce phénomène sont bien connus, et ce serait dépasser largement le cadre de la présente note que de vouloir les rappeler, même en nous limitant aux points principaux. Contentons-nous, pour la compréhension, de reproduire l'hypothèse de Beskow (1935) expliquant le principe physique de la migration de l'eau. Dans un milieu saturé d'eau et refroidi à la partie supérieure, le gel se produit à 0° tant qu'il s'agit d'eau libre. A un certain moment toutefois, la lentille de glace en train de se former ne peut plus s'accroître à la température de 0°, car l'eau proche des grains est de l'eau adsorbée fortement retenue et nécessitant une température inférieure. Sitôt cette température atteinte, la couche de molécules adsorbées se transforme en glace ; mais cette pellicule est remplacée par de l'eau montant de la partie inférieure afin de maintenir en permanence autour des grains un film d'eau adsorbée d'épaisseur constante. De la sorte, l'eau migre vers la zone de gel, et le phénomène continue aussi longtemps que le refroidissement est absorbé par la congélation de l'eau venant des zones profondes non gelées. Si la congélation est plus rapide,

c'est-à-dire si l'eau profonde n'arrive pas assez rapidement pour compenser le refroidissement, l'onde de gel progresse, descend en dessous des particules minérales qui correspondaient à la partie inférieure de la lentille de glace et en gelant l'eau plus bas, elle arrête son arrivée à la lentille de glace dont elle interrompt la croissance. L'apparition de ces ségrégations de glace nécessite donc l'établissement d'un équilibre entre le refroidissement et l'arrivée d'eau profonde, cette dernière dépendant elle-même de la perméabilité du matériel et des ressources en eau.

La force de succion est considérable et peut atteindre une valeur correspondant à une colonne de 100 m d'eau (Croney et Coleman 1961).

Cette migration de l'eau a cependant été étudiée presque uniquement du point de vue accumulation de glace ségrégative dans les couches supérieures du sol et non sous l'aspect du départ de l'eau en profondeur. Les expériences ont été en général tentées en système ouvert, l'eau arrivant librement à la partie inférieure des échantillons. Les quelques expériences effectuées en système fermé et dont nous avons trouvé trace montrent cependant que la perte d'eau en profondeur peut aller très loin dans certains cas, jusqu'à amener l'échantillon au-dessous de la limite de retrait (*). (Haley et Kaplar 1952).

LE RETRAIT DU SOL SOUS L'INFLUENCE DU DÉPART DE L'EAU

La diminution de la teneur en eau s'accompagne d'une diminution de volume qui est, au début du moins, proportionnelle à la quantité d'eau soutirée (voir fig. 3). Cette diminution de volume détermine l'apparition de fissures de retrait lorsque la plasticité du matériel (qui diminue également avec le départ de l'eau), ne permet plus de réarrangement de la matière. Les fissures de retrait apparaîtront donc plus ou moins tôt selon la nature du matériel, sa compacité, la charge qu'il supporte, sa granulométrie, etc. Il y a là un domaine de recherche fort complexe, encore peu abordé,

(*) Limite en dessous de laquelle le départ de l'eau ne détermine plus qu'un retrait peu important, car l'air pénètre à ce moment dans les pores du matériel ; un changement de couleur marqué correspond au franchissement de cette limite.

même en ce qui concerne les fissures nées de la dessiccation subaérienne.

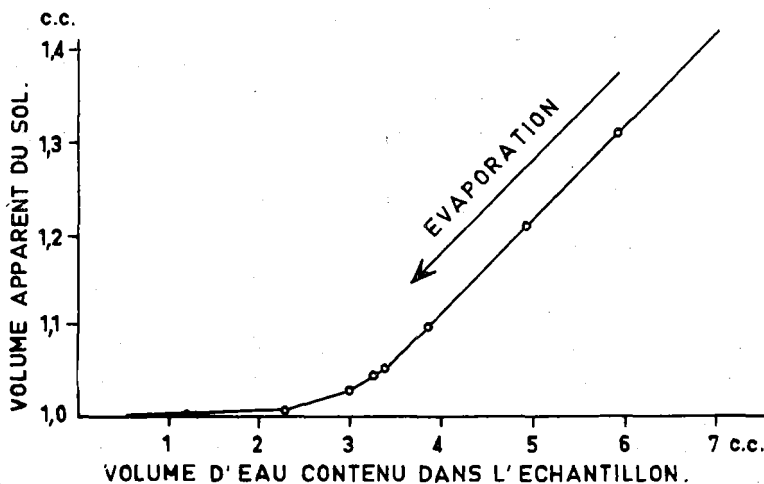


Fig. 3. — Retrait d'un sol argileux à la suite du départ de l'humidité (Haines, 1923, p. 303)

NOS EXPÉRIENCES

Après avoir démontré qu'un réseau polygonal de fissures de dessiccation apparaissait en profondeur sous l'action du gel, nous avons étudié les facteurs déterminant les dimensions des polygones.

Afin de soumettre exactement aux mêmes conditions de température plusieurs échantillons, nous avons travaillé dans la chambre froide du laboratoire du génie civil de l'Université de Liège (*), où ont été simultanément placés 10 récipients à base carrée de 50 cm de côté. Les récipients, construits en bois, et dont le fond était vitré, ont été isolés latéralement au moyen d'un isolant thermique (frigolithe).

Le matériau utilisé consistait en un limon éolien prélevé à Ans,

(*) Nous remercions vivement Messieurs les Professeurs Campus et Louis de nous avoir autorisé à travailler dans leur laboratoire. Nous prions également les personnes de la Faculté des Sciences Appliquées qui nous ont aidé et spécialement Messieurs Fagnoul, agrégé, Fafchamps, chef de travaux, Viatour, ingénieur, Degotte, maître technicien, et Bindels, technicien, de trouver ici l'expression de notre gratitude.

près de Liège, et dont la courbe granulométrique est donnée à la fig. 4. Le limon était mélangé à de l'eau, dans la proportion de 36 gr d'eau pour 100 gr de limon sec, afin d'obtenir une boue qui soit au-dessus de sa limite de liquidité et puisse de ce fait être facilement étalée.

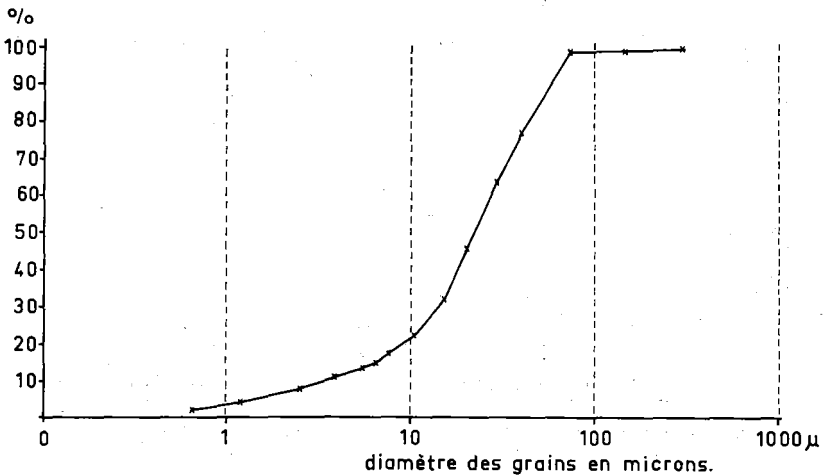


Fig. 4. — Courbe granulométrique du limon utilisé

La température a été mesurée par des thermocouples cuivre-constantan immergés dans les boues soumises au gel. Les diagrammes de températures étaient automatiquement enregistrés et permettaient de contrôler en permanence la progression du froid.

Trois facteurs déterminent la dimension des polygones : l'épaisseur du matériau expérimenté, ses caractéristiques et la vitesse de refroidissement.

En ce qui concerne le premier de ces facteurs (*), la fig. 5 montre les différents réseaux de fissures obtenus dans 6 bacs soumis simultanément aux mêmes conditions, et contenant chacun une épaisseur de sol différente, variant de 4 à 12 cm. La diminution du diamètre des polygones avec l'épaisseur du matériel est extrêmement apparente. Cette relation est matérialisée sur le graphique 6, où elle paraît bien s'exprimer par une droite. Celle-ci ne passe pas par

(*) L'importance de l'épaisseur des sédiments sur l'espacement des fissures de retrait est bien connue pour les formes de dessiccation subaérienne. (Twenhofel, 1950, p. 588).

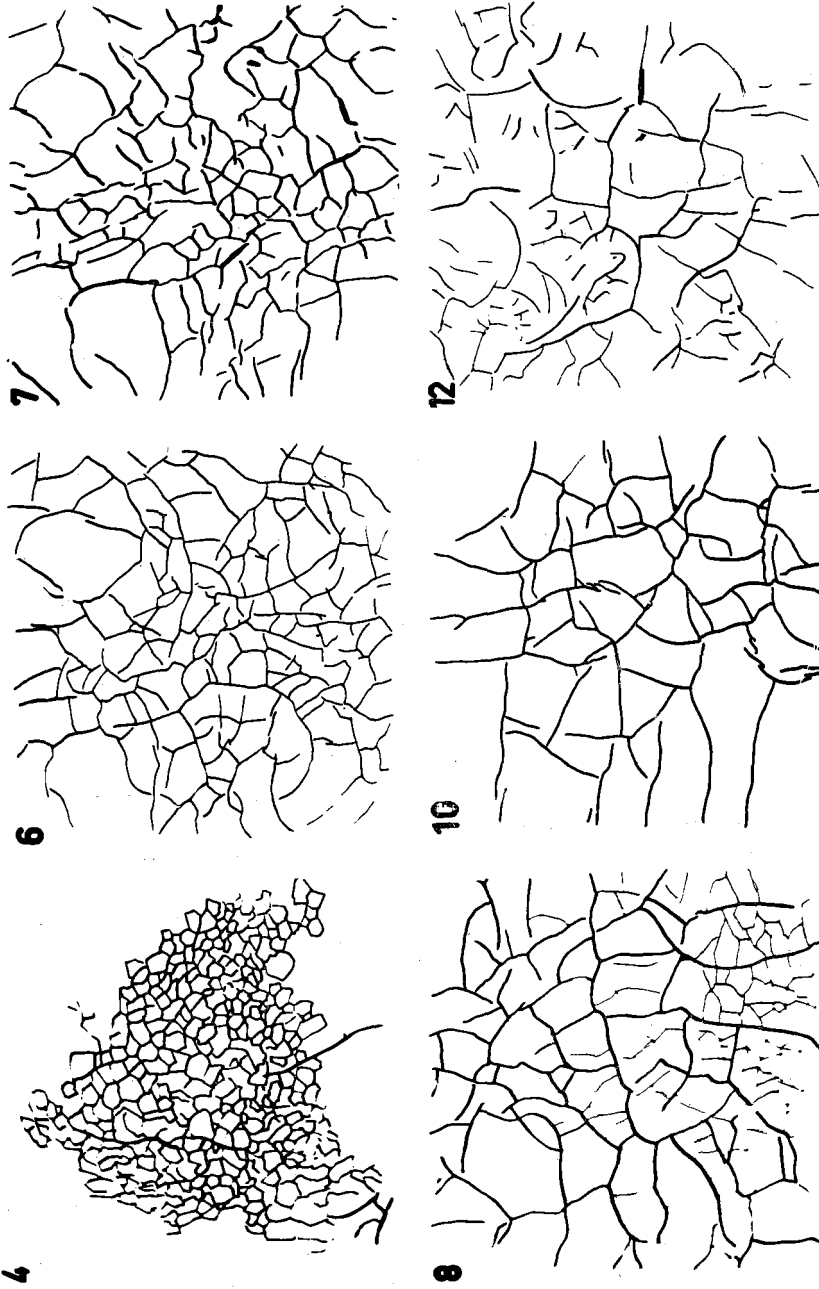


Fig. 5. — Réseaux de fissures de dessiccation apparus en profondeur dans 6 bacs ou l'épaisseur de boue variait de 4 à 12 cm. L'épaisseur exprimée en cm est inscrite dans le coin supérieur gauche de chaque figure. La longueur des côtés de chaque carré est de 45 cm. La photo n° 1 donne l'image du bac d'épaisseur 10 cm, repris ci-dessus.

l'origine du diagramme parce que la partie supérieure du sol où naissent les lentilles de ségrégation de glace ne participe pas au retrait.

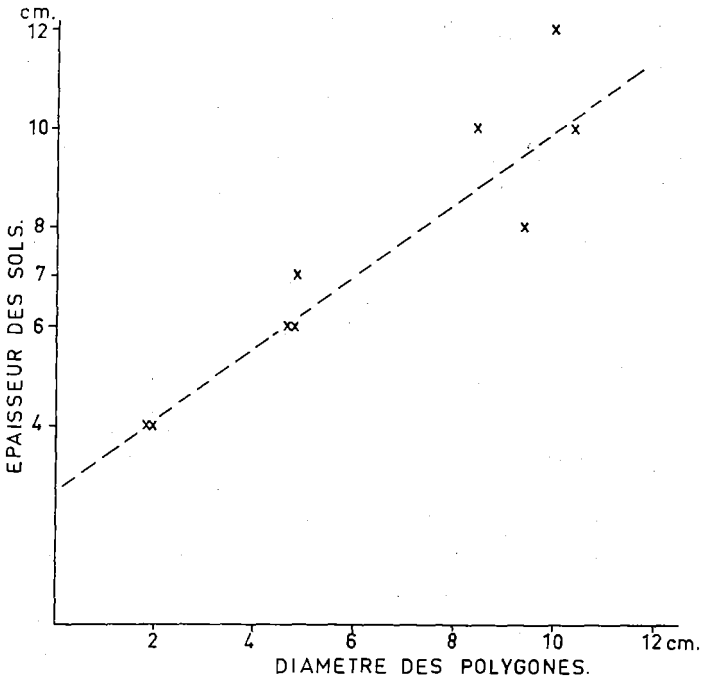


Fig. 6. — Relation entre le diamètre moyen des polygones et l'épaisseur des sols pour 9 bacs ayant subi ensemble le même refroidissement. Les réseaux représentés à la figure 5 correspondent à 6 points de ce graphique.

Cette constatation nous permet de comprendre que des couches d'épaisseur identique peuvent donner des polygones différents suivant la vitesse de refroidissement. Les polygones sont plus grands pour un gel lent que pour un gel rapide ; dans ce cas en effet les lentilles de ségrégation sont épaisses, elles se groupent dans la partie tout à fait supérieure du matériel et la zone qui subit le retrait en est d'autant accrue.

Les caractères du matériel soumis à l'expérimentation jouent également un rôle important comme l'a montré l'expérience suivante : 10 bacs de limon éolien mélangé à du kaolin dans des proportions variant de 0 à 45 % ont été exposés à un gel identique. La figure 7, où nous présentons les réseaux de fissures apparus dans

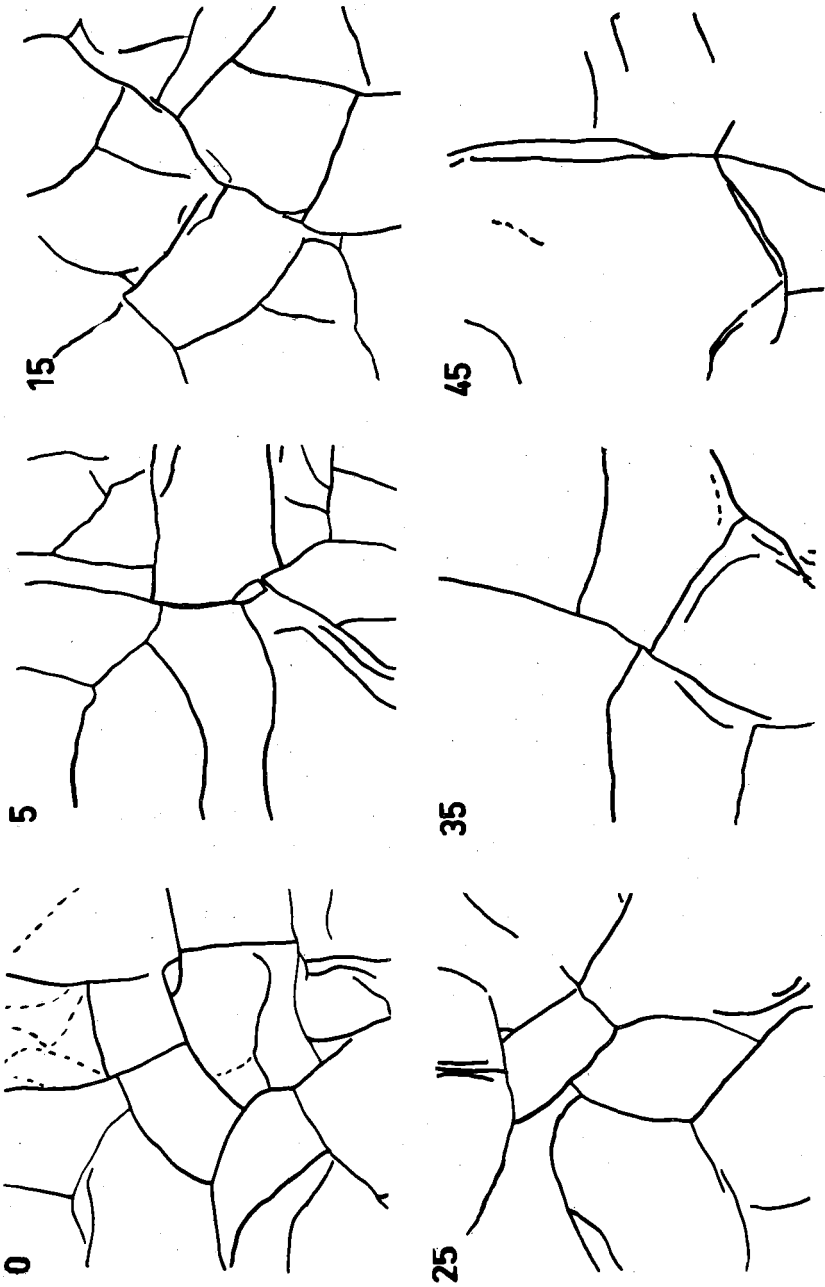


Fig. 7. — Réseau de fissures apparues dans 6 bacs de limon mélangé à des pourcentages différents de kaolin, pourcentage dont le chiffre est inscrit au coin supérieur droit de chaque figure. La longueur des côtés de chaque figure était dans la réalité de 45 cm.

6 d'entre eux, établit parfaitement que les fissures sont d'autant plus espacées que le pourcentage de kaolin est plus élevé. D'autre part, les fissures sont apparues en premier lieu dans les bacs contenant peu de kaolin. Cette expérience peut être mise en parallèle avec celle décrite par E. M. Kindle en 1917 : il a montré que des polygones de dessiccation étaient trois fois plus petits (en surface) dans de l'argile sableuse que de l'argile pure. Les facteurs principaux qui interviennent dans ce processus sont la cohésion, la perméabilité et la plasticité du matériel aux différentes teneurs en eau. Dans l'état actuel de nos recherches, nous ne pouvons séparer l'influence de chacun de ces facteurs.

CONCLUSION

Nos expériences montrent que le gel superficiel de matériaux humides, peut faire apparaître en profondeur des polygones de dessiccation (*). Nous pensons que la formation de semblables fissures de retrait est probablement à l'origine de la formation de sols polygonaux (**).

Il s'agirait d'un premier processus auquel se joindraient plusieurs autres pour arriver aux sols structuraux périglaciaires caractéristiques.

S'il en est ainsi, nous croyons toucher du doigt la raison pour laquelle les sols polygonaux apparaissent généralement en des lieux où une zone imperméable existe à faible profondeur. Une telle imperméabilité du substratum est en effet la condition requise pour que se façonnent les fissures de dessiccation décrites. Il est de ce fait vraisemblable que le rôle essentiel du permafrost est d'imperméabiliser les couches sous-jacentes. Le permafrost jouerait donc, au départ du moins, un rôle passif. Le niveau auquel il se situerait au début d'un regel déterminerait l'épaisseur du matériel subissant

(*) Cette action du gel était soupçonnée déjà en 1925 par Terzaghi, comme le rapporte Carl Troll (1944). D'autre part, W. H. Twenhofel écrivait en 1950, mais sans préciser le processus : « Des fissures très semblables à celles nées de l'assèchement apparaissent parfois quand des boues gèlent ».

(**) A. CAILLEUX et J. TRICART, dans la dernière édition de leur cours sur le modelé périglaciaire ont défendu cette hypothèse, sans toutefois détailler le phénomène, en écrivant : « La rétraction due à la dessiccation lors du gel semble devoir être l'une des principales causes » (de la formation des sols polygonaux périglaciaires).

la dessiccation et par conséquent le diamètre des polygones. Ainsi pourraient se comprendre les polygones emboîtés : ils correspondraient à des périodes de gel survenues lorsque le permafrost se trouvait à des niveaux différents.

Des expériences sont en cours pour vérifier ces hypothèses.

*Laboratoire de Géographie physique
de l'Université de Liège.*

OUVRAGES CITÉS

- BESKOW G., 1935 — Tjälbildningen och Tjällyftningen. *Statens Väginstiut, Meddelande 48, Sveriges Geologiska Undersökning, Ser. C, n° 375, Stockholm, 242 p.*
- CASAGRANDE A., 1931 — Discussion on frost heaving. *Proceedings, Highway Research Board, vol 11, Pt 1, pp. 173-177.*
- CRONEY D. et COLEMAN J. D., 1961 — Pore pressure and suction in soil. Conference organized by the British National Society of the International Society of Soils Mechanics and foundation Engineering at the Institution of Civil Engineers held on March 30th and 31st, 1960. London-Butterworths. 151 p.
- HAINES W. B., 1923 — The volume changes associated with variations of water content in soil. *J. Agr. Sci., 13, 296-310.*
- HALEY J. F. et KAPLAR C. W., 1952 — Cold room studies of frost action in soils. *Highway Research Board, publication 213, pp. 246-267.*
- KINDLE E. M., 1917 — Some factors affecting the development of mud cracks. *Journal of Geology, vol 25, pp. 135-144.*
- LINNEL K. A. et KAPLAR C. W., 1959 — The factors of soil and material type in frost action. *Highway Research Board. Bull. 225, pp. 81-127.*
- TABER S., 1929 — Frost Heaving, *Journal of Geology. Vol. 37, n° 5, pp. 428-461.*
- TERZAGHI R., 1925 — Principles of soil mechanics. *Engineering News Record, Vol. 95.*
- TRICART J. et CALLEUX A., 1961 — Cours de Géomorphologie ; Le modelé périglaciaire. Centre de documentation Universitaire, Paris, 350 p.
- TROLL C. — Strukturböden, Solifluktion und Frostklimat der Erde. *Geol. Rundschau. T. 34, 1944, 7/8, p. 545-694.*
- TWENHOFEL W. H., 1950 — Principles of sedimentation. Second Edition. Mc Graw Hill Book Company Inc., 673 p.
- WASHBURN A. L., 1956 — Classification of Patterned ground and review of suggested origins. *Bull. Geol. Soc. Amer. vol. 67, n° 7, p. 823-866. July 1956.*

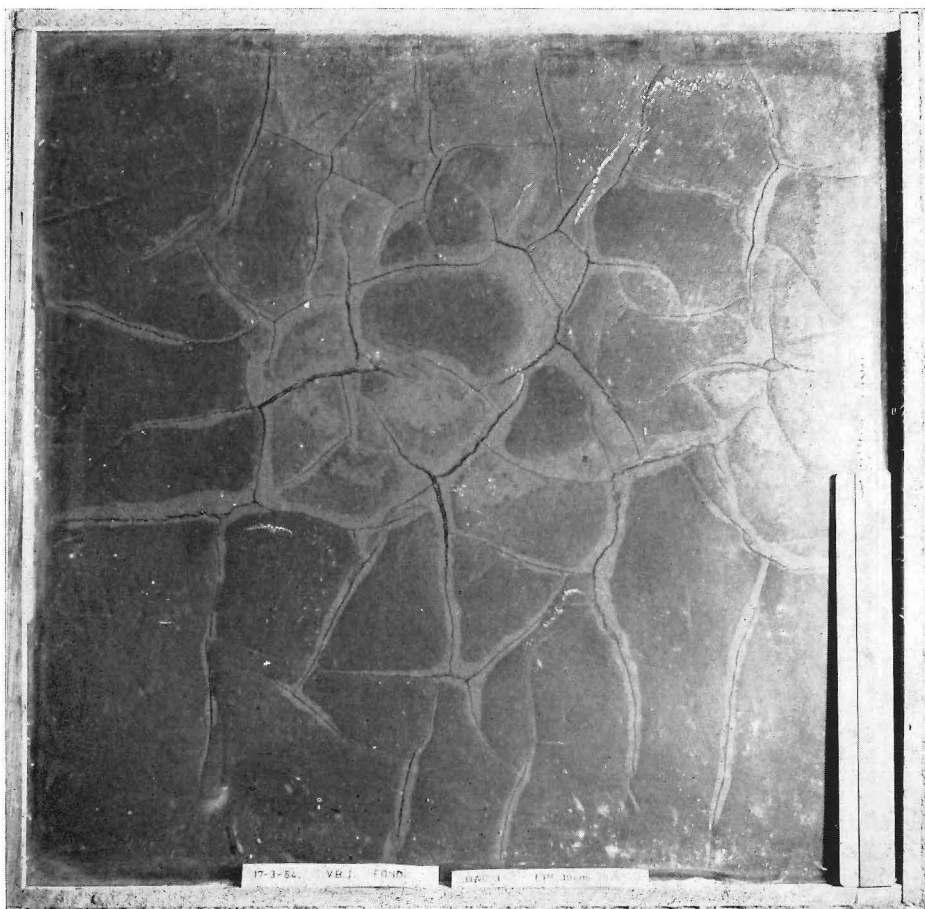


Photo 1.

Réseau polygonal de dessiccation apparu au fond d'un bac de 45 cm de côté, à la suite du gel lent de la partie supérieure. La couche de boue soumise au gel avait une épaisseur de 10 cm.

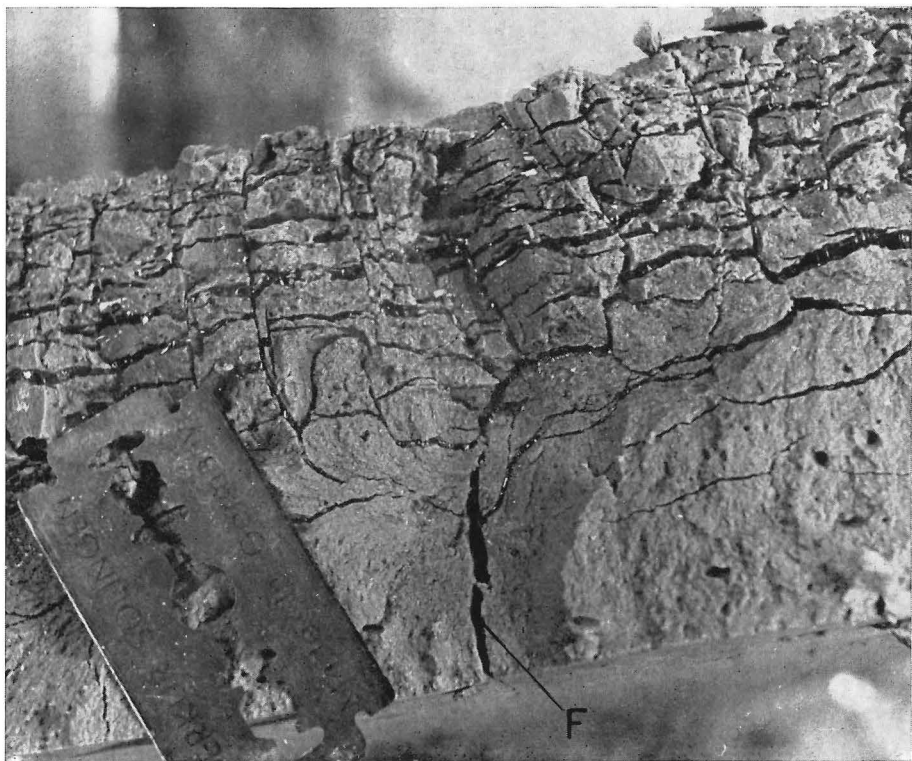


Photo 2.

Lentilles horizontales de glace de ségrégation surmontant une fissure verticale de dessiccation (F) ouverte à la suite de la migration de l'eau. Cette expérience est différente de celle donnée à la photo 1, elle n'affecte ici qu'une épaisseur de matériau de 6 cm.