

Albert Pissart

Liège

LES ÉTUDES EXPÉRIMENTALES DE L'ACTION DU GEL, VOIE DE RECHERCHE D'AVENIR

Abstract

Reasoned descriptions interpreting contemporary periglacial soils (polygonal ground, striped ground, stone circles, earth hummocks, etc...) and fossil periglacial structures (cryoturbation, vertical stones, etc...) do not enable us to discover and explain the mechanisms which produce them. Experimental work seems destined to make a fundamental contribution to the solution of this important problem. The author draws attention to the major projects that have been carried out in this field, both on the ground and in the laboratory. He emphasizes the difficulties which this work encounters and points out some lines of research. An international commission should be set up to further and co-ordinate experimental work.

LES DESCRIPTIONS SUIVIES D'INTERPRÉTATIONS N'ONT PAS PERMIS DE COMPRENDRE L'ORIGINE DE NOMBREUSES FORMES ET STRUCTURES PÉRIGLACIAIRES. ON PEUT ESPÉRER DES PROGRÈS CONSIDÉRABLES PAR DES EXPÉRIENCES

Depuis le début du siècle, de très nombreux chercheurs se sont intéressés aux "sols périglaciaires" des régions froides actuelles: sols polygonaux et striés, sols à buttes, cercles de pierres, etc... Jusqu'à ce jour les études ont consisté essentiellement en des descriptions, suivies d'essais d'interprétation. Par là, les spécialistes se sont efforcés de définir tant bien que mal les processus qui ont donné naissance aux formes observées. Nous en donnerons un exemple: les cercles de pierres ont été souvent décrits et de nombreux auteurs ont montré par ces descriptions que ces sols résultent de l'ascension vers la surface d'un matériel de granulométrie plus fine que celui dans lequel il s'élève. Toutefois le mécanisme fondamental, à savoir le mécanisme responsable de la montée de ce matériel de granulométrie différente, n'a pas été reconnu d'une manière définitive et une demi douzaine d'explications possibles sont toujours considérées actuellement (A. L. Washburn, 1969, p. 121).

Indépendamment de ces travaux, beaucoup de personnes se sont intéressées aux structures périglaciaires que l'on observe fréquemment dans les tranchées des régions ayant subi un climat froid pendant le Quaternaire: cryoturbations, cailloux dressés, fentes de gel, etc... Des descriptions soigneuses ont été présentées. On en a tiré des conclusions quant aux directions des mouvements qui se produisent; ainsi, en ce qui concerne les involutions,

on a pu affirmer dans des cas bien précis qu'il y avait montée du matériel le plus fin; dans d'autres cas, par contre, on a pu voir que le matériel le plus fin avait subi un mouvement descendant. Actuellement, les observations publiées un peu partout dans le monde ne constituent pas un ensemble cohérent à partir duquel pourraient être reconnues des règles générales, établissant le sens des déplacements des matériaux selon leurs caractéristiques. De ce fait, on n'est pas non plus parvenu à déterminer avec certitude les mécanismes responsables des perturbations observées.

Comme nous venons de le voir, ni l'étude des sols en cours de formation dans les pays périglaciaires, ni l'étude des structures périglaciaires fossiles n'ont permis de préciser exactement le rôle des divers phénomènes physiques qui peuvent intervenir dans leur formation; et ainsi s'explique que l'on ne sache généralement pas associer les formes de surface et les structures visibles en coupe. Ainsi par exemple, il n'est pas du tout certain que la formation de cryoturbations s'accompagne nécessairement en surface de l'apparition de bossèlements.

Au total donc, la recherche „descriptive-interprétative” qui a été la méthode d'étude utilisée généralement au cours des dernières décennies a conduit à un échec partiel. Cette méthode a cependant permis de dresser l'inventaire des sols périglaciaires tels qu'ils apparaissent dans les régions froides, et aussi l'inventaire des structures visibles en coupe, telles qu'elles peuvent être observées dans les régions tempérées. Ce travail fondamental descriptif ne nous a pas conduit au-delà de l'énoncé d'hypothèses génétiques diverses et, depuis plusieurs années, la recherche semble piétiner; les données „descriptives-interprétatives” s'accumulent tellement qu'il devient de plus en plus difficile de les examiner d'une manière critique et d'en extraire les faits essentiels.

Le progrès dans le domaine que nous examinons ici dépend cependant de la compréhension des mécanismes génétiques. Par là, nous arriverons à définir les conditions climatiques et les conditions géologiques propres à chaque phénomène. Quand les relations existant entre les diverses formes seront comprises, il n'y aura plus de problème de passage des formes de surface aux structures visibles en coupe; et il sera possible d'avancer des interprétations paléoclimatiques à partir des structures fossiles qui existent chez nous.

Comme nous venons de le voir, la méthode „descriptive-interprétative” n'est pas susceptible d'apporter les progrès fondamentaux que nous attendons dans ce domaine. Une voie de recherche, à peine abordée, qui s'annonce extrêmement fructueuse s'ouvre cependant à nous. Nous pouvons en espérer la reconnaissance des processus périglaciaires encore inconnus: c'est l'expérimentation; expérimentation qui peut être conduite aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. Nous considérons ci-dessous ces deux types de recherche

en montrant à la fois, les résultats qui peuvent en être attendus et les difficultés que ces travaux rencontrent.

LES RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR LE TERRAIN

MESURE DES DÉPLACEMENTS DE REPÈRES SUR LES PENTES

Les recherches expérimentales sur le terrain consistent essentiellement en l'enregistrement de déplacements de cailloux se trouvant dans leur position naturelle ou de marques déposées au préalable. Le plus souvent cependant, les études ont été effectuées sur des pentes où le sens des mouvements sont connus; elles avaient pour but d'en déterminer la vitesse. De telles mesures se sont multipliées récemment. Rappelons entre autres les publications A. L. Washburn (1947, p. 92), Michaux et Cailleux (1950), Rudberg (1958, 1962), Rapp (1958, 1959, 1960, 1961), Everett (1963, 1966), Pissart (1964), Williams (1962, 1966), Washburn (1967), Malaurie (1968) et Bénédicte (1970)¹. Le travail de Washburn rassemblant des observations accumulées de 1956 à 1961 montre combien une telle recherche peut être fructueuse. Elle a permis, non seulement de déterminer des vitesses de phénomènes, mais en outre elle a apporté des précisions quant aux processus qui interviennent.

Ainsi, sans vouloir reprendre les deux pages de conclusions (p. 117 et 118) auxquelles Washburn est arrivé, nous voudrions rappeler qu'il a pu, de la sorte, distinguer les mouvements dus à la congélifluction, les mouvements de creep engendrés par le gel et ceux liés aux variations d'humidité. Il a montré, entre autres, que pour la congélifluction le degré d'humidité est beaucoup plus important que la valeur de la pente et l'importance de la couverture végétale, que l'humidité responsable des mouvements provient essentiellement d'eau de fonte, principalement de neige, que la vitesse des lobes de gélifluction est trois fois plus grande que celles des mouvements se produisant sur des versants réguliers, etc...

MESURE DES DÉPLACEMENTS DE REPÈRES SUR DES SOLS STRUCTURAUX

A côté des travaux mentionnés ci-dessus, d'autres recherches ont été poursuivies (souvent par les mêmes auteurs) à la surface de sols structuraux périglaciaires afin de reconnaître, non seulement la rapidité des mouvements

¹ La Commission des Versants et la Sous-Commission de dynamique fluviale ont rassemblé en 1967, dans numéro spécial de la Revue de Géomorphologie dynamique, l'exposé des différentes techniques utilisées pour étudier sur le terrain l'évolution actuelle des versants.

mais encore leur direction. Citons entre autres les travaux de Michaud et Cailleux (1950), Czeppe (1961), Jahn (1961), Williams (1962), Pissart (1964), Chambers (1967), Washburn (1969).

Les deux dernières recherches citées établissent à elles seules que de tels travaux peuvent fournir des renseignements du plus grand intérêt en ce qui concerne la genèse des cercles de pierres, des polygones triés, des sols striés, etc... Ils établissent, entre autres, l'importance des phénomènes de dessiccation. M.J.G. Chambers (1967) montre comment le soulèvement différentiel des polygones triés engendre un mouvement radial des pierres par solifluxion. Par des travaux identiques effectués au Chambeyron de 1968 à 1970 nous avons établi (Pissart, 1972) l'importance des *pipkrakes* dans les déplacements de cailloux au sein de petits polygones décimétriques. Ainsi que le conclut Washburn (1969), ces travaux confirment la complexité des phénomènes et établissent l'origine polygénétique des sols structuraux périglaciaires.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES ÉTUDES EXPÉRIMENTALES SUR LE TERRAIN

Si les études expérimentales sur le terrain offrent l'avantage extraordinaire d'étudier ce qui se produit dans des conditions naturelles, elles rencontrent cependant des difficultés sérieuses. Tout d'abord, les mesures ne sont généralement possibles que pendant l'été, en raison, soit de la couverture neigeuse qui masque la surface du sol, soit simplement en raison des difficultés d'accès des régions périglaciaires étudiées. Le phénomène n'est pas suivi d'une manière continue et souvent le chercheur ne voit pas réellement le processus en action et se contente d'observer les mouvements qui se sont produits après une période plus ou moins longue. Quelques études remarquables font exception. Ainsi Z. Czeppe (1961) a suivi au Spitsberg le soulèvement du sol pendant tout un hiver², mais de tels travaux sont toujours très rares malgré leur intérêt capital. La seconde difficulté inhérente à cette méthode est l'impossibilité de contrôler les conditions expérimentales. Le développement des phénomènes est sous la dépendance de circonstances climatiques que l'observateur n'influence pas.

Malgré ces difficultés, il est certain que des travaux de ce type peuvent fournir des résultats importants. Ceux-ci paraissent actuellement porter avant tout sur la mesure de la vitesse des phénomènes en milieu naturel. Il conviendra de faire preuve d'imagination pour cerner un peu mieux les phénomènes qui se produisent. Les travaux se sont jusqu'à présent concentrés

² La construction d'appareils capables d'enregistrer le soulèvement du sol par le gel (B. Matthews, 1967) est susceptible d'aider considérablement à suivre de tels phénomènes.

sur les mouvements des cailloux et des marques dont les déplacements ont été suivis de diverses manières. Il semble du plus haut intérêt d'étudier aussi les déformations affectant le matériel meuble, par exemple en stratifiant des couches de couleurs différentes dans des conditions naturelles. Bien que l'on puisse attendre beaucoup de ces expériences et qu'il soit de plus en plus possible d'enregistrer d'une manière continue au moyen d'appareils électroniques les phénomènes qui se produisent au sein du sol, l'impossibilité de contrôler les conditions expérimentales et aussi les difficultés d'accès aux régions périglaciaires donnent aux expériences de laboratoire des avantages considérables. Pour ces raisons, il est vraisemblable que, au cours des prochaines années, les plus grands progrès dans le domaine dont il est question ici, résulteront de travaux de laboratoire.

LES RECHERCHES EXPÉRIMENTALES EN LABORATOIRE

LES TRAVAUX DES INGÉNIEURS

De multiples recherches expérimentales ont été conduites en laboratoire par des ingénieurs en vue de comprendre les mécanismes responsables de la destruction des routes. Les travaux de laboratoire poursuivis par Bouyoucos de 1914 à 1923, et par Taber dès 1916 ont montré comment les cristaux de glace de ségrégation qui apparaissent dans les sols fins soumis au gel expliquent à la fois le soulèvement du sol par le gel et son instabilité au moment du dégel.

Ce sont ces travaux expérimentaux qui ont établi le bien fondé de l'hypothèse que l'eau migrait vers la zone de gel. Or cette hypothèse avait été défendue dès 1765 par Runeberg qui avait trouvé dans un échantillon d'argile gelée à peu près 4 fois autant d'eau que dans l'argile sous-jacente non gelée. Les expériences ont permis de faire dans ce domaine des progrès définitifs et elles se sont multipliées par la suite dans tous les pays du monde. Nous n'entrerons pas ici dans le détail de ces études, bien qu'elles présentent un intérêt fondamental au point de vue géomorphologique. La littérature dans ce domaine est extrêmement abondante et ne peut pas être passée en revue ici. Le lecteur trouvera dans la publication de A.W. Johnson (1952) une revue très complète des travaux antérieurs à 1951 qui traitent de ces problèmes.

LES EXPÉRIENCES DE GÉLIVATION

A première vue les recherches expérimentales en laboratoire paraissent très faciles à réaliser. C'est cependant une illusion. Même les expériences

les plus simples, à savoir les essais de gélivation, rencontrent des difficultés insoupçonnées. La préparation d'échantillons dont la résistance n'est pas diminuée par les techniques de prélèvement, leur imbibition en eau, les multiples manipulations posent de nombreux problèmes et nécessitent un travail considérable. Les études expérimentales de la gélivation en laboratoire sont déjà relativement nombreuses³: Birot (1947), J. Tricart (1953, 1956), E. Bonifay (1955), J. Godard & F. Houel-Ganglof (1965), Martini (1967), J. Malaurie (1968), P. Gabert & J-P. Lautridou (1969), Potts (1970), Y. Guillien et J. P. Lautridou (1970), P. Gabert et J. P. Lautridou (1970), J. P. Lautridou (1970), J. P. Coutard, M. Helluin, J. P. Lautridou et J. Pellerin (1970).

La majorité de ces études ont été réalisées pour mesurer la rapidité de fragmentation de roches diverses sous l'effet de gels d'intensité variable. Les résultats sont utilisés ensuite pour rendre compte de la morphologie. Ces travaux présentent un intérêt considérable et doivent incontestablement être poursuivis et développés. Cependant, dans ce domaine pourtant bien étudié, des études fondamentales restent à faire. La majorité des auteurs se contentent d'enregistrer la fragmentation de la roche sans analyser le mécanisme physique qui en est responsable. Birot (1962) d'une manière théorique, puis Malaurie (1968), à la suite de travaux de terrain et de laboratoire, ont étudié réellement le problème et ont montré que les pores doivent être obturés à l'extérieur pour que des pressions s'exercent. Malaurie estime que le gel d'eau en surfusion doit être le mécanisme essentiel, alors que, pour notre part, nous pensons que le gel d'eau capillaire (Pissart, 1970) est le phénomène capital. R. Gerard (1969), (ingénieur à la recherche d'un critère de gélivité plus rapide que de longs essais de gel en laboratoire) a montré que la résistance au gel est liée à la dimension des capillaires⁴. Ses essais ont en effet montré que si, dans un échantillon, 90% des pores ont un diamètre inférieur à 2μ , cet échantillon résiste mal au gel. La loi de Jurin indique que c'est dans des pores de diamètre un peu inférieur à 2μ que l'eau est tenue fortement par les forces capillaires ; aussi, il nous paraît vraisemblable que c'est la quantité de pores dont le diamètre est inférieur à $0,5\mu$ qui joue un rôle fondamental. De nouvelles expériences sont, dans ce domaine, indispensables. Des études dilatométriques et calorimétriques paraissent susceptibles d'apporter des résultats définitifs qui présenteraient d'ailleurs un intérêt pratique immédiat.

³ Il existe en outre de nombreuses études poursuivies par des ingénieurs. Des références sont données entre autres par Corte (1969, p. 150).

⁴ En 1968, P. Birot affirmait théoriquement la même chose.

**LES EXPÉRIENCES SUR L'ACTION DU GEL DANS LES SOLS;
LES DIFFICULTÉS**

Si comme nous venons de le voir, les études expérimentales de la gélification sont relativement nombreuses, beaucoup moins d'expériences ont été réalisées en laboratoire pour étudier les effets géomorphologiques du gel dans les sols. Les ingénieurs ont bien effectué de nombreux essais depuis que la glace de ségrégation a été découverte mais sans aborder les problèmes qui se posent aux chercheurs étudiant le Quaternaire. Les études appliquées ont porté avant tout sur le soulèvement du sol par le gel (conséquence de la croissance de glace de ségrégation) et sur les modifications de cohésion de celui-ci lors du dégel. Les recherches des ingénieurs ont été réalisées dans des cylindres dont le diamètre n'excède pas 15 cm, et dans de telles conditions, ils ne pouvaient pas étudier les déplacements relatifs des matériaux de granulométrie ou de composition différente.

Les agronomes, pour leur part, se sont également intéressés à l'action du gel dans les sols, en se penchant sur les modifications de structure qui en résultent. Leurs travaux sont également éloignés des préoccupations habituelles des géologues.

Les expériences de laboratoire portant sur l'action du gel dans des matériaux meubles offrent des difficultés bien plus grandes que celles rencontrées dans des essais de gélification. Les conditions naturelles ne sont, en effet, pas facilement reconstituées. Notons spécialement 5 difficultés:

(1) La structure d'une masse de boue obtenue en mélangeant de la terre avec de l'eau est certainement assez différente de celle que présente un sol naturel gorgé d'eau.

(2) Dans une chambre frigorifique, l'humidité se condense sur les éléments réfrigérants et l'assèchement continu de l'air de la chambre froide entraîne une évaporation intense à la surface des échantillons qui y sont exposés.

(3) Il est souvent difficile d'éviter toute influence des parois latérales. D'une part, il convient que le gel ne pénètre pas par les côtés du bac qui subit l'expérience, d'autre part, il ne faut pas que l'échantillon adhère en gelant aux parois du récipient (pour éviter cet inconvénient il faut enduire les parois de graisse).

(4) La pénétration du gel au sein d'un bac de boue placé dans une chambre froide est incomparablement plus rapide que ne le serait la pénétration du gel dans une masse identique faisant corps avec le sol. En effet, par conductibilité thermique, une quantité importante de chaleur est transmise du sous-sol. dans le sol qui se refroidit. Dans des conditions expérimentales, si l'on veut se rapprocher des conditions naturelles, il faut contrôler la pénétration du gel dans le bac de boue que l'on étudie. Dans les expériences que nous réalisons, la vitesse de pénétration verticale de l'onde de gel est déterminée en contrôlant

à la fois la température de l'air à la partie supérieure du bac de terre et la température de l'air au contact de la partie inférieure de ce bac.

(5) A première vue, les expériences de laboratoire permettent de gagner du temps en supprimant les „temps morts” c'est-à-dire les périodes où rien ne se passe, soit que le sol soit entièrement gelé, soit qu'il soit totalement dégelé. Ce raisonnement s'est révélé, au moins en partie erroné. D'une part, les essais dilatométriques que nous effectuons montrent que des modifications de volume se poursuivent sous 0°C pendant de nombreux jours à la suite du gel de l'eau tenue le sol. D'autre part, la structure apparue au gel, à la suite du tassement des agrégats compris entre les lentilles de glace de ségrégation, persistent très longtemps après le dégel; aussi, pour effectuer un second gel dans des conditions identiques à celles qui existaient au départ, il faut attendre que ces structures disparaissent. (Cette destruction ne se produit rapidement que par dessiccation complète de l'échantillon, suivi de sa rehydratation).

LES EXPÉRIENCES SUR LES DÉPLACEMENT DES CAILLOUX PAR LE GEL DANS ET EN SURFACE DES SOLS

Les chercheurs, géologues ou géographes, qui ont entrepris des expériences ayant pour but de reconnaître les phénomènes se produisant dans les sols sous l'action du gel, ont le plus souvent commencé par exposer au gel des bacs contenant un mélange de boue et de cailloux. L'espoir était de voir apparaître des polygones triés sous l'action des alternances répétées de gel et de dégel. Jusqu'à présent ces essais se sont révélés infructueux. Ils ont montré cependant que les cailloux se déplacent vers la surface et, si l'expérience était effectuée avec une alimentation extérieure en eau, il ont mis en évidence le soulèvement du sol par le gel. C'est à la suite d'expériences de ce type que nous nous sommes intéressés au déplacement des cailloux par le gel et à la croissance de glace de ségrégation.

Des travaux expérimentaux excellents ont été publiés par A. Corte (1962a, b, c) sur ce sujet. Il a montré entre autres que non seulement les cailloux se déplaçaient vers la source de gel, mais encore que les éléments fins migraient en sens opposé. Il s'agit là d'un résultat important entièrement neuf et qui résulte, soulignons-le, uniquement de recherches de laboratoire. Nous avons montré, par la suite, aussi expérimentalement (Pissart, 1969), que le déplacement des cailloux engendrait leur rotation et que l'on pourrait expliquer ainsi les cailloux dressés que l'on rencontre si souvent dans les sols périglaciaires.

Corte et Higashi (1964) ont produit ensuite des travaux sur la dessiccation des sols car ce mécanisme est fondamental dans la formation de certains sols polygonaux.

L'action des pipkrakes s'étant révélée au Chambeyron d'une importance considérable dans les déplacements des cailloux qui se produisent dans des champs de sols polygonaux, des expériences de laboratoire devraient être poursuivies dans cette direction. Des pipkrakes soulevant des cailloux de plusieurs centimètres ont été réalisés dans notre laboratoire en maintenant la surface du sol à une température de 0°C. De telles expériences combinant gel et dessiccation (migration des cailloux vers la surface, ouverture de fissures de dessiccation et déplacement des cailloux à la surface par croissance des pipkrakes) devraient conduire, après un temps plus ou moins long, à l'apparition de polygones triés.

Les déplacements des cailloux sous l'action du gel, au sein du sol et en surface, constituent des phénomènes périglaciaires fondamentaux. Les mécanismes sont actuellement bien connus et l'effort principal de la recherche doit porter à présent sur l'explication de phénomènes, à mon sens, plus importants encore, à savoir ceux qui sont responsables de déplacements de masse au sein du sol, c'est-à-dire ceux qui engendrent les cryoturbations.

LES EXPÉRIENCES RECHERCHANT L'ORIGINE DES CRYOTURBATIONS

Les essais effectués jusqu'à présent pour faire apparaître de cryoturbations par des expériences de laboratoire sont peu nombreux. J. Tricart a publié dès 1954 une courte note relatant des expériences de solifluxion périglaciaire. Il décrivait à la suite de celles-ci l'apparition de microcryoturbations au contact de diverses couches. Il n'en tirait cependant aucune conclusion génétique. S. Dżułyński (1963, 1966) par une série d'expériences a souligné que, indépendamment de tout gel, des déformations peuvent apparaître dans des sédiments meubles gorgés d'eau et ayant des densités différentes. K. Philberth (1964) a montré l'existence de mouvements au sein de masse de terre soumises au gel en y enfonçant des lamelles de plomb dont il mesurait la déformation. A. Corte (1969), après avoir stratifié des couches de silt et de sable dans des bacs atteignant 30 cm de largeur a obtenu après 57 cycles de gel/dégel des déformations importantes. Il s'agit réellement de cryoturbations que l'auteur explique par la formation inégale de lentilles de glace. Ce succès suscitera sans doute de nombreuses autres expériences ayant pour but de cerner le détail des mécanismes qui entrent en jeu. Nous avons, pour notre part, effectué également une série d'expériences dans des bacs de 50 cm de côté et 10 cm d'épaisseur dans l'espoir de faire apparaître des cryoturbations en gelant simultanément par le haut et par le bas. Les déformations que nous avons obtenues après seulement 10 cycles de gel/dégel pouvaient s'expliquer soit par l'adhérence du matériel meuble entre les parois, soit par la progression latérale du gel au sein de la masse étudiée (Pissart, 1970).

Les recherches expérimentales portant sur l'origine des cryoturbations ont donc, à ce jour, été peu nombreuses. C'est sans doute parce qu'elles exigent non seulement une longue préparation mais encore un contrôle soigneux pendant plusieurs mois: en effet, un cycle de gel/dégel dans une masse de boue de 10 cm d'épaisseur demande plusieurs jours.

LES MESURES DES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES SE PRODUISANT LORS DU GEL

Une autre voie de recherche expérimentale consiste à suivre directement les phénomènes qui se produisent en cours de gel. Cette méthode de travail permet d'effectuer de courtes expériences et de travailler toujours avec un matériel neuf, non affecté par les modifications de structures consécutives à un premier gel. Le problème principal à surmonter est de disposer d'appareils de mesure assez précis pour suivre des mouvements relativement faibles. K. Philbert (1964) a entrepris des mesures de ce type en étudiant avec un dispositif très simple les pressions qui se développent dans le sol sous l'action du gel. Il a montré ainsi que le sol, partiellement ou complètement gelé, restait déformable sous l'effet de forces assez grandes. Ne disposant pas d'appareils suffisamment précis, il n'avait pu pousser très loin ses mesures. Pour notre part, nous avons suivi de diverses manières les phénomènes qui se produisent pendant le gel dans des masses de boue:

- (a) en enregistrant les pressions que subit une jauge électronique incorporée au sein du sol,
- (b) en suivant le déplacement d'aiguilles enfoncées dans le sol avec une inclinaison de 45° ,
- (c) en enregistrant avec un transducer déplacement les mouvements que subit la surface de bacs de boue soumis au gel,
- (d) en enregistrant, au moyen de jauges de contrainte, les mouvements se produisant dans le sol,
- (e) en effectuant des mesures dilatométriques.

Seuls, quelques résultats de ces recherches ont été publiés. En 1970, nous avons présenté deux courbes donnant les variations de pression observées au sein de bacs de boue en train de geler. Si l'interprétation que nous avons donnée de ces courbes doit être quelque peu modifiée, il subsiste que toutes ces observations établissent qu'il se produit au sein du sol gelé, alors que la température est inférieure à 0°C , des mouvements non négligeables. Ces mouvements résultent de la transformation de phase, de l'eau fortement tenue dans les sols, eau qui gèle à une température inférieure à 0°C . Les mesures dilatométriques montrent que ces variations de volume ne peuvent pas s'expliquer uniquement par l'apparition de glace ordinaire (glace 1).

Il est indubitable que nous trouvons là des phénomènes insoupçonnés dont les conséquences géomorphologiques sont considérables. Nous avons déjà souligné (Pissart, 1970) que l'on pourrait sans doute y trouver l'origine de cryoturbations et de mouvements de masses de granulométrie différents, comme ceux qui se produisent dans les cercles de pierres ; en outre, il est vraisemblable que ce phénomène joue un rôle considérable dans l'apparition des fentes de gel.

CONCLUSIONS

CES RECHERCHES DOIVENT ÊTRE ENCOURAGÉES

Cet inventaire rapide des recherches expérimentales périglaciaires est extrêmement encourageant. Mis à part les travaux sur la gélivation qui sont un peu plus anciens, la majorité des recherches ont été effectuées au cours des dix dernières années. En ce laps de temps court et bien que seulement un petit nombre de chercheurs se soient consacrés à ces travaux, les résultats acquis sont remarquables. Le sont plus encore, les promesses de progrès considérables que dévoilent les travaux actuels. Certes de telles recherches sont longues et difficiles. Elles demandent du temps, de la main d'oeuvre, et des appareillages parfois coûteux. Il n'empêche que actuellement beaucoup de laboratoires s'équipent et que l'on peut prévoir des progrès importants au cours de la prochaine décennie. Il s'agit non seulement de la découverte des processus, mais encore de permettre (enfin !) une classification satisfaisante, car génétique des sols périglaciaires ; il s'agit aussi de relier les structures périglaciaires vues en coupe avec des formes connues en surface ; il s'agit enfin de permettre des interprétations paléoclimatiques à partir des structures dont l'origine serait enfin établie.

Les recherches, dans ce domaine fondamental, sont longues et les progrès ne sont acquis qu'après de nombreux tâtonnements. Il ne faut pas que les essais infructueux soient perdus. En conséquence, il est vivement souhaitable qu'une commission „pour l'étude des processus périglaciaires par des expériences de laboratoire et des expériences sur le terrain” soit constituée sans tarder. Son rôle consisterait non seulement à diffuser aux chercheurs traen outre vaillant dans ce domaine des informations sur les essais effectués dans les différents laboratoires ; elle établirait en outre un pont indispensable entre les expériences de terrain et de laboratoire qui doivent se compléter et s'éclairer mutuellement ; elle diffuserait parmi ses membres des renseignements sur les équipements utilisés, les appareils électroniques existant ou à concevoir ;

elle aurait, enfin, pour but de coordonner les recherches et de les promouvoir. Ces travaux doivent être d'autant plus encouragés que, dès à présent, ils laissent entrevoir des résultats présentant des applications pratiques.

Bibliographie

- Aguirre-Puente, J. et Philippe, A., 1969 – Quelques recherches effectuées en France sur le problème de la congélation des sols. *Revue Générale de Thermique*, n° 96; p. 1123–1141, Paris.
- Benedict, J. B., 1970 – Downslope soil movement in a Colorado Alpine Region: Rates, Processes, and Climatic Significance. *Arctic and Alpine Research*, vol. 2; p. 165–226.
- Biro, P., 1962 – Contribution à l'étude de la désagrégation des roches. Centre de Documentation Universitaire, Rue de la Sorbonne, 5, Paris. 232 p.
- Biro, P., 1968 – Précis de Géographie Physique Générale. 3è ed., Armand Colin, Bd. St Michel 103, Paris; 340 p.
- Bonifay, E., 1955 – Le rôle du gel dans la fissuration des galets de roche calcaire. *C.R.Acad. Sci.*, t. 240; p. 896–898.
- Bouyoucos, G. J., 1923 – Movement of soil moisture from small capillaries to the large capillaries of the soil upon freezing. *Jour. Agricultural Research*, vol. 24; p. 427–431.
- Butrym, J., Cegła, J., Dżułyński, S., Nakonieczny, S., 1964 – New interpretation of periglacial structures. *Folia Quaternaria*, 17; Ktraków.
- Centre Scientifique et technique de la construction-san date – Nouveaux critères de gé-livité pour la réception des matériaux de construction. *Note d'information technique*. 50; p. 1–16, Rue de la Violette, 5, Bruxelles.
- Chambers, M. J. G., 1967 – Investigations of patterned ground at Signy Island, south Orkney Island: III, miniature patterns, frost heaving and general conclusions. *Br. Antarct. Surv. Bull.*, n° 12; p. 1–22.
- Commission des versants et Sous-Commission de Dynamique Fluviale de la Commission de Géomorphologie Appliquée de l'U.G.I., 1967 – Techniques de terrain pour l'étude des versants et de la dynamique fluviale. *Revue. Géomorph. Dynamique*, t. 17; p. 147–187.
- Corte, A., 1962a – The frost behavior of soils – Part I, vertical sorting. *Highway Research Board. Bull.*, 317; p. 9–34.
- Corte, A., 1962b – The frost behavior of soils – Part II, *Highway Research Board, Bull.*, 331; p. 46–66.
- Corte, A., 1962c – Particle Sorting by Repeated Freezing and Thawing. *Science*, vol. 142; p. 499–501.
- Corte, A., 1969 – Formacion en el Laboratorio de Estructuras como Pliegues por Congelamiento y Descongelamiento Multiple. *Cuartas Jornadas Geologicas Argentinas*, t. 1: p. 215–227.
- Corte, A., 1969 – Geocryology and Engineering. Reviews in Engineering Geology II. Published by: The Geological Society of America – Boulder Colorado, U.S.A.; p. 119–185.
- Corte, A. et Higashi, A., 1964 – Experimental Research on Desiccation Cracks in Soil. *U.S.Army, Corps of Engineers, CRREL, Research Rept.*, 66; 72 p.
- Coutard, J. P., Helluin, M., Lautridou, J. P., Pellerin, J., 1970 – Gélifraction expé-

- rimentale des calcaires de la campagne de Caen; comparaison avec quelques dépôts périglaciaires de cette région. *Centre de Géomorph. de Caen, Bull.* n° 6; p. 7-44.
- Czeppe, Z., 1961 – Annual course of frost ground movements at Hornsund (Spitsberg) 1957-1958. *Prace Inst. Geogr. Univ. Jagiellońskiego*, Zesz. 25; 74 p.
- Czeppe, Z., 1966 – The course of the main morphogenetic processes in South-West Spitsbergen. *Univ. Jagellonica, Acta Scientiarum litterumque*, 77, fasc. 13; 125 p.
- Dylik, J., 1957 – Dynamical Geomorphology, its nature and methods. *Bull. Soc. Sci. Lettr. de Łódź*, vol. 8, no. 12; 42 p.
- Dźułyński, S., 1963 – Polygonal Structures in Experiments and their Bearing upon some Periglacial Phenomena. *Bull. Acad. Polon. Sci., Sér. Géol., Géogr.*, vol. 11; p. 145-150.
- Dźułyński, S., 1966 – Sedimentary Structures Resulting from Convection like Pattern of Motion. *Rocznik Polskiego Tow. Geol.*, t. 36; p. 3-21.
- Everett, K. E., 1963 – Slope movement: Neotoma Valley, S. Ohio. *Inst. of Polar Studies* n° 6; 59 p.
- Everett, K. E., 1963 – Quantitative measurement of soil movement. *Geol. Soc. Amer. Spec. paper* 73; p. 147-148.
- Everett, K. E., 1963 – Instrumentation for measuring mass wasting. National Research Council International Conference on Permafrost, Purdue Univ. 1963; 12 p.
- Everett, K. E., 1966 – Slope movement and related phenomena, environment of Cape Thompson Region, Alaska. Chapter 12; p. 172-220, The Inst. of Polar Studies, The Ohio State Univ.
- Gabert, P. et Lautridou, J. P., 1969 – Gélifraction artificielle et gélifraction au cours Quaternaire. *Méditerranée*, n° 3; p. 293-312.
- Gabert, P. et Lautridou, J. P., 1970 – Comportement au gel de quelques calcaires de la région d'Aix-en-Provence. *Centre de Géomorph. de Caen, Bull.* n° 6; p. 67-72.
- Gerard, R., 1969 – Détermination de la résistance au gel des matériaux de construction par la porométrie au mercure. *Centre Sci. et techn. de la construction, Revue* n° 1, janvier, février 69; p. 6-15.
- Godard, J. et Houel-Ganglof, F., 1965 – Essais de gélifraction artificielle pratiqués sur des calcaires et des grès lorrains. *Revue géogr. de l'Est*, p. 125-139.
- Guillien, Y. et Lautridou, J. P., 1970 – Recherches de gélifraction expérimentale du centre de géomorphologie. I: Calcaires de Charente. *Centre de Géomorph. de Caen, Bull.* n° 5; p. 3-50.
- Jahn, A., 1961 – Quantitative Analysis of some Periglacial Processes in Spitsbergen. *Univ. Wrocławski, Zeszyty Naukowe*, ser. B, n° 5; 54 p.
- Jahn, A., 1964 – Some news experimental attempts to explain soil structures in periglacial zone. (Manuscrit communiqué par A. Jahn à A. Pissart le 1.2.64)
- Jahn, A., 1968 – Research by the periglaciological group "Hornsund North". Polish Academy of Sci. – Polish Spitsbergen Expedition 1957-1960; p. 167-171, Warszawa.
- Johnson, A. W., 1952 – Frost action in roads and airfield; a review of the literature. Highway Research Board, Special Report n° 1. p. 1-187, Washington D. C.
- Lautridou, J. P., 1970 – Gélivité de la craie de Tancarville: le "head" de l'estuaire de la Seine. *Centre de Géomorph. de Caen, Bull.* n° 6; p. 45-66.
- Malaurie, J., 1968 – Thèmes de recherche géomorphologique dans le Nord-Ouest du Groenland. *Mémoires et Documents du C.N.R.S.* Numéro hors série, Paris, 495 p.
- Martini, A., 1967 – Preliminary experimental studies on frost weathering of certain rock types from the West Sudetes. *Biuletyn Peryglacjalny*, no. 16; p. 147-194.

- Masseport, J., 1959 – Premiers résultats d'expériences de laboratoire sur les roches. *Rev géogr. Alpine*; p. 531–537.
- Matthews, B., 1967 – Automatic measurement of frost heave: Results from Malham and Rodley (Yorkshire). *Geoderma*, 1; p. 107–115; Elsevier, Amsterdam.
- Michaud, J. et Cailleux, A., 1950 – Vitesses des mouvements du sol au Chambeyron (Basses Alpes). *C. R. Acad. Sci., (Paris)*, t. 230; p. 314–315.
- Philberth, K. 1964 – Recherches sur les sol polygonaux et striés. *Biuletyn Peryglacjalny*, no. 13; p. 99–198.
- Pissart, A., 1964 – Contribution expérimentale à la genèse des sols polygonaux. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 87, n° 7; p. 213–223.
- Pissart, A., 1964 – Vitesses des mouvements du sol au Chambeyron (Basses Alpes). *Biuletyn Peryglacjalny* no. 14; p. 303–309.
- Pissart, A., 1966 – Expériences et observations à propos de la genèse des sols polygonaux triés. *Revue belge de Géographie*, t. 90; p. 1–20.
- Pissart, A., 1969 – Le mécanisme périglaciaire dressant les pierres dans le sol. Résultats d'expériences. *C.R.Acad. Sci. (Paris)*, t. 268; p. 3015–3017.
- Pissart, A., 1970 – Les phénomènes physiques essentiels liés au gel, les structures périglaciaires qui en résultent et leur signification climatique. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 93, fasc. 1; p. 7–49.
- Pissart, A., 1972 – Vitesse des mouvements de pierres dans des sols et sur des versants périglaciaires au Chambeyron (Basses Alpes). Les Congrès et Colloques de Université de Liège. T. 67; p. 251–268.
- Potts, A. S., 1970 – Frost action in rocks: some experimental data. *Transactions Inst. of British Geographers*, vol. 49; p. 109–124.
- Rapp, A., 1960 – Talus slopes and montains walls at Tempelfjorden, Spitzbergen. *Norsk Polarinstituts Skrifter*, n° 119; 96 p.
- Rapp, A., 1961 – Recent development of Mountains slopes in Karke Vagge and Surroundings, Northern Scandinavia. *Geogr. Annaler*, vol. 42; p. 65–200.
- Rapp, A., 1962 – Kärkewagge, some recordings of mass-movements in the Northern Scandinavian Mountains. *Biuletyn Peryglacjalny*, no. 11; p. 287–310.
- Rudberg, S., 1958 – Some observations concerning mass movement on slopes in Sweden. *Geol. Fören Stockholm Förhandl.*, Bd. 53.
- Rudberg, S., 1962 – A report on some observations concerning periglacial geomorphology and mass movement on slopes in Sweden. *Biuletyn Peryglacjalny*, no. 11; p. 321–323.
- Runenberg, E. O., 1765 – Anmarkningar om nagra Forandringar Pa Jord-Ytan i Allmanhet och under de Kalla Climat i Synnerhet. *Kungl. Vetensk. Akad. Handl.*, p. 81–115.
- Smith, J., 1960 – Cryoturbation data from South Georgia. *Biuletyn Peryglacjalny*, no. 8; p. 73–79.
- Taber, S., 1930 – The mechanics of frost heaving. *Jour. Geol.*, vol. 38; p. 303–317.
- Tricart, J., 1953 – Résultats préliminaires d'expériences sur la désagréation des roches sédimentaires par le gel. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, t. 236; p. 296–1298.
- Tricart, J., 1954 – Premiers résultats d'expériences de solifluxion périglaciaires. *C. R. Acad. Sci. (Paris)*, t. 238; p. 259–261.
- Tricart, J., 1956 – Etude expérimentale du problème de la gélivation. *Biuletyn Peryglacjalny*, 4; p. 285–318.
- Washburn, A. L., 1947 – Reconnaissance geology of portions of Victoria Island and adjacent regions, Arctic Canada. *Geol. Soc. America, Memoir* 22; 142 p.

- Washburn, A. L., 1967 – Instrumental observations of mass wasting in the Mesters Vig District, Northeast Greenland. *Meddelelser om Groenland*, Bd. 166, n° 4; 297 p.
- Washburn, A. L., 1969 – Weathering, frost action, and patterned ground in the Mesters Vig District, Northeast Greenland. *Meddelelser om Groenland*, Bd. 176, n° 4; 304 p.
- White, S. E., 1971 – Rock Glacier Studies in the Colorado Front Range, 1961 to 1968. *Arctic and Alpine Research*, vol. 3; p. 43–64.
- Williams, P. J., 1957 – The direct recording of solifluction movements. *Amer. Jour. Sci.*, vol. 255; p. 705–714.
- Williams, P. J., 1962 – Quantitative investigations of soil movement in frozen ground phenomena. *Biuletyn Peryglacjalny*, no. 11; p. 353–362.
- Williams, P. J., 1966 – Downslope soil movement at sub-arctic location with regard to variations with depth. *Canadian Geotechnical Jour.*, vol. 3; p. 191–203.