

REPORTS OF THE LABORATORY EXPERIMENTS

ACTIVITY OF WORKING GROUP OF THE PERIGLACIAL COMMITTEE OF THE I.G.U.

INTRODUCTORY

The following reports were prepared as one of the activities of the Periglacial Committee, a Working Group of the International Geographical Union. It is hoped the reports will aid in furthering periglacial research and laboratory studies of frost action. Not all the laboratories engaged in such studies are represented, but it is anticipated the reports will be periodically revised and the coverage extended in future volumes of the *Biuletyn Peryglacjalny*.

The Committee expresses its appreciation to the responding laboratories and their directors for their cooperation, and to Professor DYLIKOWA, Editor of the *Biuletyn Peryglacjalny*, for opening the Biuletyn's pages to Committee reports.

Albert PISSART
Chairman,
Periglacial Committee, IGU

AKIRA HIGASHI

Director, Ice Research Laboratory

ICE RESEARCH LABORATORY, DEPARTMENT OF APPLIED PHYSICS,
HOKKAIDO UNIVERSITY, SAPPORO, JAPAN

RESEARCH PROGRAM OF LABORATORY EXPERIMENTS
ON PERIGLACIAL PHENOMENA

- (1) Theoretical studies on similarity law of model experiments of periglacial phenomena.

Literature surveys are under way for establishing a general similarity law to perform appropriate model experiments of periglacial phenomena which are the complex of various physical processes governed by heat conduction, capillary flow of water, frost heaving, visco-elastic mud flow etc.

- (2) Laboratory experiment for determining the equivalent height of water suction with wicks.

In experiments of frost heaving, wicks of various materials and indeterminate numbers were hitherto often used for sorption of water from the bottom of the open system freezing cabinet without any information about its equivalence of soil above the ground water level. Simple experiments are under way for determining the velocity of water suction with certain types of wicks under controlled conditions to be used in model experiments.

GENERAL

Research activities of this laboratory have been mainly focused on solid state studies of ice crystals, especially the mechanical properties of ice associated with the dynamical behavior of dislocations in the crystal and the growth mechanisms of nearly perfect single crystals of ice.

The frozen ground research was initiated several years ago based upon the Director's previous research in this field and his continued interests in mechanisms of patterned-ground formation. This activity was initiated by the visit of Dr. A. E. CORTE to this laboratory in 1969 under the sponsorship of both the Japanese Association for the Promotion of Sciences and the Argentine National Council of Science and Technology. At that time, cooperative research was carried out on model experiments of solifluction and mound formation, both of which were believed to be essential to understanding periglacial geomorphic phenomena. Outlines to these experiments are described in the next section. Further details are presented in HIGASHI and CORTE (1971, 1972). After Dr. CORTE's departure, the laboratory's frozen ground research program lagged except for Dr. HIGASHI's parti-

cipation in the program of the Periglacial Research Laboratory of the Quaternary Research Center at the University of Washington. One laboratory experiment and other theoretical studies that are presently under way at the Ice Research Laboratory in Hokkaido are described below.

RESEARCH

MODEL EXPERIMENTS OF SOLIFLUCTION

The objectives of this experiment were to (a) improve methods for the measurement of soil particle movements during repeated freeze—thaw cycles, including movements at both the soil surface and at depth, and (b) obtain quantitative results regarding the effects of factors that are difficult to evaluate in field observations. Natural slopes were simulated in a cabinet, the lower part of which was a tilted box ($67 \times 42 \times 15$ cm) filled with soil to a depth of 10 cm. The soil was subjected to freezing and thawing from the top by a refrigerating coil and electric heaters installed in the cabinet top.

Soil movement was measured with the aid of reference particles (glass marbles 15 mm in diameter, thin plastic plates, and pumice stones) that were aligned at 5-cm intervals along lines perpendicular to the slope. Their distances along the slope from their original position were measured after each freeze—thaw cycle. The same measurements for particles at depth were carried out by excavating the soil after two or three freeze—thaw cycles.

Experiments performed for three different angles of slope (3° , 7.5° , and 15°) revealed that particle movement in the frost-creep stage, prior to significant gelifluction, was influenced not so much by the amount of excess water as by the angle of slope. Average movement of particles on the line was proportional to the square of the tangent of angle Θ of slope inclination. This multiple slope-angle effect is caused by the growth of needle ice, and either (a) the subsequent bending and collapse of the needles that heaved the particles, or (b) the slip and rotation of particles during thawing of the needles or in the wet soil, or both (a) and (b).

GROWTH AND DEVELOPMENT OF PERTURBATIONS OF THE SOIL SURFACE DUE TO FREEZE—THAW CYCLES

This experimental research was directed toward determining the process responsible for earlier stages of mound formation in arctic environments. The same cabinet utilized for the solifluction experiments, but horizontally placed, was filled with soil to a depth of 7 to 10 cm. After the soil was evenly compacted and the surface smoothed, it was subjected to repeated freeze—thaw cycles with a periodicity of 10 days. This gave rise to increasing perturbations of the ground surface. The degree of perturbation development was measured by mapping the areal density of contour lines as determined from surface height at 126 grid points on the surface. The stan-

dard deviation of these height measurements was also calculated. Both the height and the standard deviations increased linearly with the number of cycles, up to the 5th cycle.

The number of cycles achieved was inadequate to determine the existence of any pattern habit, but it was noted that the strongest perturbations occurred at or near the boundaries of different soil types. This result was interpreted as caused by differential soil movements resulting from the different frost-susceptibility characteristic of the soils. The perturbations in a homogeneous soil decreased rapidly with depth as shown by decreasing deformation of the soil layers in vertical section. It is recommended that experiments be carried out with a larger number of freeze—thaw cycles.

DETERMINATION OF THE EQUIVALENT HEIGHT OF WATER SUCTION WITH WICKS

In experiments of frost heaving and in model studies of solifluction or of patterned ground, it has been common practice to use wicks of various materials and indeterminate number for sorption of water from a reservoir at the bottom of an opensystem freezing cabinet. However, there is a complete lack of information about their effectiveness in substituting for a related thickness of soil above the water reservoir. This problem was investigated experimentally by comparing rates of water sorption into soil that was placed in a container with wicks of varying length extending to the water reservoir below.

This sorption rate was measured continuously by weighting the total weight of the soil in the container, using a sensitive spring balance designed for this purpose. Experimental results obtained to date show that the rate of water sorption into dry soil can be interpreted as a diffusion process in porous media, in which the boundary conditions is given by different diffusion rate. The rate is actually the product of the permeability of a wick and the hydraulic pressure, which can be converted to the equivalent height of water rise in a soil of known permeability. Data analyses based upon this mathematical model are under way to determine the rate at which water is supplied by wicks of different length and thickness.

THEORETICAL STUDIES ON SIMILARITY LAWS OF MODEL EXPERIMENTS OF PERIGLACIAL PHENOMENA

In the model studies of solifluction and mound formation, appropriate selection of the dimensions and time scale of freeze—thaw cycles should be based on similarity law derived from fundamental equations governing the phenomena investigated. In our earlier experiments, only the differential equation of heat conduction was considered. However, since the real phenomena consist of the complex of various physical processes, such as heat conduction, moisture diffusion, mud flow, etc., it is necessary to establish a general similarity law or to find a better way to let different similarity laws for each successive process operate together. Literature surveys pertaining to these objectives are now being made.

PUBLICATIONS

HIGASHI, A. and CORTE, A. E., 1971 — Solifluction: A Model Experiment. *Science*, vol. 171; p. 480—482.

CORTE, A. E. and HIGASHI, A., 1972 — Growth and Development of Perturbations on the Soil Surface due to the Repetition of Freezing and Thawing. *Bulletin Centre de Géomorphologie de Caen*, No. 13—14—15; p. 117—129.

Also in: *Memoirs of Faculty of Engineering*, Hokkaido Univ. III, Supplement; p. 49—63 (May 1972).

A. PISSART
Directeur

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

1. *Nom du Laboratoire:*

Laboratoire de Géologie et Géographie Physique
de l'Université de Liège

Adresse: Place du XX Août, 7, 4000, Liège, Belgique

Année de création: 1959

2. *But ou intitulé général des recherches*

Géomorphologie périglaciaire. Recherche de la genèse des sols structuraux périglaciaires et des cryoturbations

3. *Administration*

Nom du Directeur actuel: Albert PISSART, Docteur en Sciences, Professeur associé

Organisation administrative: Laboratoire Universitaire

4. *Personnel*

Chercheur: 1

Technicien: 1

5. *Matériel*

Budget 1974

Fonctionnement annuel: 100.000 F. B. (2.500 \$)

Salaires annuels: 500.000 F. B. (12.000 \$)

Principales installations et gros appareils: 2 chambres froides.

La plus grande est constituée de 2 chambres superposées de surface utile 2×2 m

6. *Orientation actuelle des recherches*

(1) Etude des variations de volume d'échantillons de terre gelés lorsque la température fluctue sous 0°C

(2) Formation artificielle de sols périglaciaires par des alternances de gel et de dégel

(3) Etude des microstructures apparaissant dans les sols sous l'action du gel

Resumé de l'auteur

Les recherches effectuées au cours des dix dernières années dans le laboratoire de géographie physique de l'Université de Liège sont résumées brièvement. Le programme d'études en cours est détaillé et l'équipement utilisé est décrit. Les difficultés rencontrées sont exposées.

Les essais suivants sont relatés bien qu'un certain nombre d'entre eux se soient révélés infructueux:

a) Essai de réalisation de polygones décimétriques triés en exposant des bacs de boue et de cailloux à des alternances de gel et de dégel.

- b) Etude du déplacement des cailloux par le gel et de leur basculement éventuel au cours du soulèvement.
 - c) Démonstration de l'apparition d'un réseau de fissures de dessiccation au fond de bacs de boue lorsque, à la partie supérieure, grandissent des lentilles de glace de ségrégation.
 - d) Réalisation de pipkrakes et déplacement des cailloux par ces cristaux de glace.
 - e) Gel et dégel de bacs de boue stratifiée dans l'espoir de provoquer des cryoturbations.
 - f) Mesures des pressions, des mouvements au sein de la masse et du soulèvement de la surface dans des bacs de matériel divers soumis au gel.
 - g) Mesures dilatométriques d'échantillons de sols sous l'action du gel.
- Les points e, f, g, constituent avec l'étude des microstructures dues au gel le programme de travail actuel du laboratoire.

RECHERCHES EFFECTUÉES 1959—1965

Le premier appareil frigorifique construit pour le laboratoire de géomorphologie de l'Université de Liège a été acheté en 1959. Ses caractéristiques sont données plus loin, lorsque nous décrivons l'équipement actuel du laboratoire. Cet appareil frigorifique avait été commandé après une visite du laboratoire du professeur J. TRICART à Strasbourg qui nous avait conseillé d'acquérir un équipement de dimension suffisante pour étudier l'action du gel dans des sédiments meubles.

Les premiers essais réalisés ont été des expériences de gélivation sur des roches ardennaises. Ces travaux n'ont pas été poursuivis longtemps en raison des difficultés d'échantillonnage qui se posent au sein des roches primaires de l'Ardenne que nous voulions étudier. Il nous était apparu, en effet, qu'il est extrêmement malaisé de passer d'essais de laboratoire à l'explication de la morphologie en raison des multiples variations lithologiques qui existent au sein de ce massif fortement plissé.

Les quelques essais qui ont été effectués, utilisaient la méthode appliquée par J. TRICART quelques années auparavant (TRICART, 1957). Ils montraient d'une part que la résistance au gel des quartzites et des phyllades de l'Ardenne est considérable, et d'autre part, que les schistes de la Famenne se délitent très facilement sous l'action du gel.

Dès 1961, nous avons réalisé dans cette chambre froide des essais sur l'action du gel dans des bacs de boue. Nous avons commencé en exposant des bacs de boue mélangés avec des cailloux à des alternances de gel et de dégel. Chaque jour la surface du bac était photographiée et nous espérions pouvoir suivre la formation de polygones triés de petite dimension. Cet espoir a été déçu, mais nous avons observé l'apparition et la sortie de la masse de boue d'un certain nombre de cailloux.

L'étude de ces mouvements de cailloux nous a montré toute l'importance de la glace de ségrégation dans ce phénomène. Pour contrôler l'apparition de celle-ci, nous avons réglé la vitesse de pénétration de l'onde de gel dans la masse de boue. Ceci a été réalisé en chauffant au cours de l'expérience la partie inférieure de la masse de boue. De belles lentilles de glace de ségrégation ont grandi de la sorte au sein de la masse boueuse; toutefois nous ne sommes pas parvenu à ce moment à faire apparaître des pipkrakes. L'échec était dû à un contrôle insuffisant des températures, au-dessus et en-dessous du bac.

En 1962, en faisant apparaître la glace de ségrégation aux endroits voulus, nous avons spécialement étudié le soulèvement des cailloux par le gel au sein des masses

de limons. Des éléments de taille et de forme variées ont été immergés à des profondeurs connues et les déplacements subis ont été mesurés après plusieurs cycles de gel—dégel. Nous avons trouvé de la sorte des résultats identiques à ceux que A. CORTE a publié la même année, du moins en ce qui concerne l'influence de la taille et de la dimension des éléments.

Plusieurs essais ont été effectués à la même époque pour expliquer les cailloux dressés. Des parallépipèdes rectangles taillés dans du quartzophyllade étaient disposés dans la boue avec une inclinaison soigneusement mesurée de 45° . Leurs positions, après que plusieurs gels aient engendré un soulèvement incontestable, étaient mesurées. Cette expérience ne permit pas de montrer qu'un redressement (basculement vers la verticale) accompagnait le soulèvement. Cet échec était dû essentiellement à ce que, au cours de l'expérience, se produisait un tassement du matériel englobant les blocs de pierre. Ce tassement qui résulte du soutirement de l'eau a tendance à diminuer l'inclinaison des cailloux.

L'intérêt que nous avons porté à la glace de ségrégation nous a amené à étudier la redistribution de l'humidité dans les bacs sous l'action de gel et nous avons montré alors que l'assèchement profond engendré par la croissance des lentilles de glace de ségrégation à la partie supérieure d'un bac de boue, pourrait faire apparaître en profondeur un réseau de fissures de dessiccation (PISSART, 1964). Afin d'exposer au gel simultanément plusieurs bacs de boue, ces expériences ont été conduites dans la chambre froide du laboratoire du Génie civil de l'Université de Liège. Comme précédemment, la croissance des lentilles de glace de ségrégation a été contrôlée en maintenant l'isotherme de 0°C à la profondeur où les couches de glace devaient apparaître. Ceci a été réalisé en réchauffant au moyen de résistances la partie inférieure des bacs soumis au gel. Les températures au cours de cette expérience ont été mesurées au moyen de thermocouples cuivre-constantan reccordés à un potentiomètre à 12 courbes Philips qui venait d'être acheté par le laboratoire.

Depuis 1965, une chambre froide plus spacieuse et permettant un meilleur contrôle de la température a été utilisée (voir description plus loin). Tout de suite, des pipkrakes ont été obtenus avec cet appareil. Des cailloux disposés à la surface des bacs expérimentés ont été soulevés et déplacés par ces cristaux de glace superficiels. Leurs mouvements paraissaient anarchiques en ce sens qu'ils ne conduisaient pas à l'apparition de polygones triés. Ces observations nous ont poussé à admettre que dans les sols polygonaux décimétriques triés les déplacements des cailloux devaient être dirigés par l'apparition d'un microrelief que nous avons essayé de faire apparaître. Divers essais infructueux ont été réalisés dans des bacs où existait déjà un réseau de fissures de dessiccation, pour provoquer par le gel le soulèvement des centres de ces polygones.

LES RECHERCHES ACTUELLEMENT EN COURS

Dans le même but de comprendre les mécanismes intervenant dans l'apparition des sols polygonaux triés, nous nous sommes consacrés, après 1966, à l'étude des

mouvements qui se produisent au sein de matériaux meubles sous l'action des gels et des dégels. Les essais effectués ont été poursuivis avec la conviction que tous les phénomènes qui se produisent au moment de la congélation des sols humides ne sont pas parfaitement connus.

Trois types d'expériences sont effectuées; les résultats qu'elles fournissent doivent s'éclairer mutuellement. Il s'agit:

- a) de l'étude des déformations qui affectent des bacs de boue préalablement stratifiés, après qu'ils aient subi plusieurs cycles gel—dégel;
- b) de mesures directes de pression, du soulèvement de la surface et de déformations que subissent les masses de boue pendant les alternances de gel et de dégel;
- c) de mesures dilatométriques pour rendre compte des mouvements précédemment observés. Des mesures calorimétriques et de résonance nucléaire magnétique ont été réalisées simultanément à l'Institut de Chimie et à l'Institut de Physique de l'Université de Liège.

DÉFORMATIONS DE BACS DE BOUE SOUMIS AU GEL

Des bacs carrés de 50 cm de côté sont remplis de boue sur une épaisseur variant entre 5 et 10 cm. Afin de visualiser les déformations qui se produisent, la masse de boue est constituée de couches horizontales ou verticales diversement colorées. Ces bacs ont été soumis à des alternances de gel—dégel, rapides ou lentes, progressant uniquement depuis la surface ou simultanément depuis la surface et le fond des bacs.

L'influence des parois des bacs est apparue, dès le début des expériences comme un agent perturbateur considérable. Des déformations importantes apparaissent rapidement à proximité des parois et aussi à la suite de la pénétration latérale du gel. L'adhérence du sol gelé sur les parois verticales des bacs a été supprimée en les enduisant de graisse avant de les remplir de boue. La pénétration latérale du gel a été limitée en isolant le mieux possible les parois des bacs soumis au gel.

Les déformations provoquées par ce dispositif expérimental sont faibles et non concluantes, du moins après une dizaine de cycles gel—dégel, dans un matériel homogène et cela même quand le gel progresse simultanément depuis la surface et le fond des bacs de boue.

Le nombre d'alternance gel—dégel subies par le matériel était insuffisant pour donner des déformations importantes, aussi nous sommes décidés à recommencer sous peu des expériences identiques en utilisant cependant un matériel différent.

Le choix du matériel utilisé est, en effet, fondamental; il sera déterminé par les résultats des expériences dilatométriques mentionnées ci-dessous.

Une des causes de l'échec enregistré est l'utilisation de limons dont la structure est complètement modifiée après un premier gel. L'apparition de glace de ségrégation provoque, en effet, la formation d'une structure polyédrique qui persiste très longtemps. Seule, une réhydratation après une dessiccation complète est capable de détruire cette structure. Dans un matériel limoneux, il est apparu clairement

que le premier gel agit très différemment des gels ultérieurs vu les modifications de structures qui se produisent au sein de l'échantillon. Pour cette raison, nous avons abandonné momentanément l'étude des déformations au moyen de bacs stratifiés et nous avons concentré nos efforts sur l'étude des phénomènes qui se produisent au cours du premier gel (PISSART, 1970).

Par ailleurs, comme les modifications de structures dues au gel sont extrêmement importantes, leur étude a été entreprise récemment. Des échantillons sont soumis à diverses alternances de gel et de dégel et, après induration dans du plastique et préparation de lames minces, les structures apparues sont étudiées au microscope (Etude réalisée par B. VAN VLIET-LANOË, Gand).

MESURES PHYSIQUES AU SEIN DE BACS DE BOUE GELANT ET DÉGELANT

Dès 1968, des mesures des variations de pressions enregistrées par une jauge de pression électronique immergée au sein des sols soumis au gel ont été effectuées. Des pressions considérables, positives, suivies parfois par des dépressions (par rapport à la pression atmosphérique) ont été enregistrées. La recherche des phénomènes responsables de ces variations de pression, nous a conduit à utiliser simultanément des jauges de contrainte (Kyowa) immergées dans la masse de boue, des mesureurs de déplacement (Hewlett Packard) nous donnant le soulèvement de la surface au cours du gel et des photographies (appareil automatique Robot) des mouvements qui affectent au même moment des aiguilles inclinées à 45° dans la masse de boue (PISSART, 1969, 1970, 1971, 1972).

L'interprétation complète des résultats de ces mesures s'est révélée être extrêmement difficile. Ils montrent cependant clairement que des déformations se produisent au sein d'échantillons de boue gelée alors que la température fluctue en-dessous de 0°C . Ces mouvements proviennent incontestablement du gel d'eau qui, dans les sédiments meubles et fins, change de phase à une température inférieure à 0°C . Ce phénomène nous paraît susceptible d'expliquer certaines cryoturbations et d'intervenir dans beaucoup de phénomènes géomorphologiques.

MESURES DILATOMÉTRIQUES

Les mouvements observés résultent, bien entendu, de variations de volume que subissent les échantillons. Afin de connaître ces variations de volume, des mesures dilatométriques ont été entreprises. Elles sont réalisées en mesurant les fluctuations de niveau dans un capillaire gradué, fixé à l'extérieur du frigo et relié au récipient contenant l'échantillon placé dans la chambre froide. La réalisation de ces mesures rencontre des difficultés, à première vue insoupçonnées, que nous exposons plus loin. Les corrections dues aux fluctuations de température du liquide qui remplit le capillaire et le dilatomètre, ainsi que les corrections indispensables pour tenir compte des variations de volume des récipients sont calculées par ordinateur.

Ces mesures dilatométriques montrent que les courbes dilatométriques des différents matériaux expérimentés (kaolinite, illite, montmorillonite, limons, sables) sont très différentes. Les essais actuellement en cours ont pour but de déceler l'influence des pressions extérieures sur la dilatation des échantillons et de vérifier dans quelle mesure les courbes obtenues peuvent être appliquées dans la nature. Il semble en effet que la dilatation ne soit pas toujours identique lorsque la masse de terre étudiée s'appuie contre les parois du dilatomètre.

Comme dit précédemment, ces essais doivent conduire à un choix judicieux des matériaux à utiliser dans de nouvelles expériences visant à faire apparaître des cryoturbations.

L'EQUIPEMENT UTILISÉ

LES APPAREILS FRIGORIFIQUES — LEURS CARACTÉRISTIQUES ET LEURS DÉFAUTS

Deux appareils frigorifiques existent dans notre laboratoire. Le premier a été construit en 1959 d'après nos plans par la firme Kelvinator. Il a une dimension intérieure de $80 \times 80 \times 100$ cm. A la livraison, il atteignait une température de -25°C . Il a été modifié par la suite pour atteindre une température de -40°C . Par la même occasion, des résistances ont été introduites près des éléments réfrigérants, afin de pouvoir provoquer un dégivrage sans ouvrir l'appareil. La température de la chambre froide est contrôlée par des thermostats et peut être commandée soit manuellement soit par une horloge de façon à obtenir des alternances de gel—dégel programmées. Le différentiel (fluctuation de la température autour de la consigne) dépasse 1°C . Il peut être réduit en isolant au sein de la chambre froide les échantillons étudiés, mais, bien entendu, dans ce cas, la puissance du gel est diminuée.

En 1965, une autre chambre froide a été construite pour notre laboratoire par la firme Frigiwall de Liège. Le volume intérieur de cette chambre est de $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$. Elle est constituée en fait de deux chambres froides superposées où la température peut être maintenue indépendamment l'une de l'autre à toute valeur comprise entre $+20$ et -25°C . Le différentiel de chacune de ces chambres est inférieur à $0,2^{\circ}\text{C}$. Dans cet appareil, les bacs de boue qui sont soumis au gel sont disposés de telle sorte qu'ils constituent la cloison entre les deux chambres superposées. Par le réglage des températures de ces deux chambres, la température de la surface et celle du fond des bacs expérimentés peuvent être contrôlées, et il est possible d'obtenir dans le matériel étudié la vitesse de pénétration du gel que l'on souhaite.

Des programmeurs de température peuvent commander automatiquement les températures des chambres froides. Ils sont constitués d'un système d'horlogerie qui fait défiler devant un palpeur, des disques de plastique découpés selon le programme que l'on veut obtenir. Bien entendu, la commande des températures peut également se faire manuellement.

La chambre froide décrite ci-dessus permet, en maintenant l'isotherme de 0°C à une profondeur choisie de faire grandir dans les bacs de boue expérimentés des lentilles de glace de ségrégation. En maintenant l'isotherme de 0°C à la surface des bacs de boue, des pipkrakes (cristaux de glace de ségrégation superficiels) ont été obtenus. Leur croissance entraînait le soulèvement et le déplacement en surface des cailloux qui y étaient distribués. Des difficultés imprévues ont eu pour origine l'absence d'une uniformisation complète de la température au sein des chambres froides. La circulation de l'air dans les deux chambres engendrait des différences de température qui d'un endroit à l'autre pouvait atteindre 2°C. Il était, de ce fait, impossible d'obtenir en même temps sur toute la surface des seize bacs de boue de 50×50 cm qui étaient exposés au gel, une croissance simultanée de pipkrakes. Une amélioration considérable a été apportée en distribuant l'air plus régulièrement au moyen de diffuseurs, simples tuyaux amenant l'air froid et reprenant l'air réchauffé, dans toute la chambre froide. Une uniformisation parfaite des températures n'a toutefois pas été obtenue au sein des deux chambres froides.

Le dégivrage des chambres froides pose en outre, un problème sérieux. Les échantillons soumis au gel sont des échantillons de boue qui subissent une forte évaporation au cours de l'expérience. La vapeur va se condenser sur les éléments réfrigérants, les couvre de glace et diminue rapidement la puissance de l'appareil. Ce phénomène impose des dégivrages journaliers qui sont obtenus au moyen de résistances électriques placées à proximité des éléments réfrigérants. La commande du dégivrage peut être manuelle ou être déclenchée automatiquement par une minuterie. Pour éviter, pendant ces dégivrages, un réchauffement trop important de la chambre froide, des volets se ferment pendant cette opération et isolent les éléments réfrigérants de la chambre froide elle-même. Malgré ce dispositif, tout dégivrage entraîne un réchauffement sensible au sein de la chambre froide. Cet inconvénient ne peut être supprimé qu'en doublant le système de refroidissement, ce qui permettrait le dégivrage d'un système de refroidissement pendant que l'autre maintiendrait constante la température de la chambre froide.

LES BACS DE BOUE

Les bacs de boue utilisés jusqu'à présent sont des bacs carrés de 50 cm de côté, dont l'épaisseur varie entre 5 et 20 cm. Le matériel minéral employé a toujours été mélangé à une quantité d'eau importante au moyen d'une malaxeuse NEWA, capable de préparer 50 dm³ de sédiment; la boue est alors répartie en une couche uniforme dans le fond des bacs et une prise d'humidité nous donne la teneur en eau de l'échantillon au début de l'expérience. L'importance des phénomènes d'évaporation nécessite une alimentation en eau après chaque dégel. Celle-ci est réalisée en versant de l'eau dans des tubes perforés introduits verticalement aux quatre coins des bacs. Dans certaines expériences, une alimentation en eau est prévue à la partie inférieure du bac et, pour que l'eau se répartisse dans toute la masse, une couche de sable d'une épaisseur de 1 cm est disposée au fond de celui-ci. L'alimen-

tation en eau des bacs est réalisée de l'extérieur en contrôlant le niveau de l'eau dans des récipients raccordés aux bacs soumis aux expériences. Cette alimentation en cours de gel permet avec un réglage judicieux de la température d'obtenir d'épaisses lentilles de glace de ségrégation aux profondeurs choisies.

Pour obtenir des boues stratifiées, les sédiments ont été colorés au moyen de teintures pour peintures au latex. Il semble que ce colorant n'affecte ni la granulométrie, ni le comportement au gel des sédiments utilisés.

LES APPAREILS DE MESURES

Les appareils de mesures électroniques utilisés sont raccordés à des potentiomètres enregistreurs. Nous disposons actuellement d'un enregistreur à 12 courbes de marque Philips et d'un enregistreur à 24 courbes de marque Honeywell.

Les températures sont mesurées au moyen de thermocouples cuivre-constantan disposés en surface et au sein de l'échantillon de façon à suivre la progression du gel.

Les pressions développées au sein des bacs de boue ont été enregistrées au moyen de jauges de pression Barber—Coleman. Un problème d'isolation de ces jauges de pression contre l'humidité existe. Des jauges de pression miniatures Kulite n'ont pas donné satisfaction, l'humidité pénétrant à l'intérieur après quelques heures.

Les mouvements que subissait le sol en cours de gel ont été enregistrés au moyen de jauges de contrainte Kyowa (strainingages). Deux problèmes sérieux posent la préparation de ces jauges de contrainte: à savoir, d'une part le choix du support à utiliser et d'autre part, leur isolation contre l'humidité. Le support choisi a consisté en des lames d'acier très minces. Ces fines lames d'acier ont été adoptées en raison de leur grande résistance et de leur excellente souplesse. Il est indispensable en effet que, après le dégel le support ne ramène pas la jauge de contrainte dans sa position initiale par simple retour élastique. L'effort que peuvent engendrer les très minces lames d'acier légèrement déformées pour revenir aux conditions de départ est très faible. L'isolation définitive des jauges de contrainte a été obtenue par immersion dans du latex.

Les soulèvements de la surface des bacs de boue ont été suivies au cours de toutes les expériences au moyen de mesureurs de déplacement Hewlett Packard. Ces appareils sont capables de déceler des déplacements extrêmement faibles.

Le soulèvement de la surface, ainsi que le déplacement d'aiguilles enfoncées obliquement dans la masse de boue soumise au gel, ont été photographiés au moyen d'un appareil photographique automatique Robot, équipé d'un flash annulaire. La présence d'un réticule devant le bac subissant l'expérience a permis de suivre les mouvements subis par ces repères. Une minuterie permettait de commander automatiquement les prises de vue à intervalles réguliers.

LES MESURES DILATOMÉTRIQUES

La variation de volume subie par les sols sous l'action du gel a été étudiée jusqu'à présent; sans doute parce que ces mesures offrent des difficultés que ne posent pas des mesures calorimétriques qui ont été, elles, fréquemment utilisées. La méthode que nous avons employée consiste à soumettre au gel un échantillon placé dans un récipient rempli de liquide et raccordé à un capillaire gradué, disposé à l'extérieur de la chambre. Les calculs des corrections à apporter pour la dilatation du récipient et du liquide sont effectués par ordinateur.

Deux problèmes sérieux ont été rencontrés. Le premier est le choix d'un liquide qui ne gèle pas, qui reste absolument neutre par rapport à l'échantillon et qui n'est pas absorbé par celui-ci. Il convient donc que la tension superficielle de ce liquide soit inférieure à celle de l'eau afin qu'il ne se substitue pas à l'eau de l'échantillon. Nous utilisons, au cours de nos essais, de l'huile pour appareil frigorifique qui ne gèle pas à -40°C (B. P. Energol LPT 40). Afin de vérifier l'influence d'une pénétration éventuelle de l'huile dans les échantillons, des expériences sont effectuées également en enfermant les matériaux étudiés dans des sacs de plastique ou de caoutchouc. Cette façon de procéder rend cependant impossible la mise en place de thermocouples au sein de l'échantillon.

Il est important, d'autre part, que les échantillons étudiés ne contiennent pas d'air. En effet, la libération du gaz, qui au départ est compris dans l'échantillon, se produit inmanquablement à la suite de la fracturation par le gel du matériel étudié; or ce phénomène apparaît extérieurement comme une augmentation de volume. Par ailleurs, lorsque de l'air est compris dans le dilatomètre, les résultats obtenus lorsque la température varie sont complètement faussés vu le coefficient de dilatation très élevé des gaz.

Afin d'expulser l'air inclus, les échantillons de boue ont été soumis à ébullition pendant 1/4 heure. Le taux d'humidité a, par la suite, été réduit par évaporation.

Ces difficultés nous ont conduit à mettre en service en 1975, un nouvel équipement destiné à mesurer les dilatations linéaires au lieu de dilatations volumétriques.

References

- CORTE, A., 1962 — Particle sorting by repeated freezing and thawing. *Science*, vol. 142, n° 3591; p. 499—501.
- EK, C. et PISSART, A., 1965 — Dépôt de carbonate de calcium par congélation et teneur en bicarbonate des eaux résiduelles. *C. R. Ac. Sc. Paris*, t. 260; p. 929—932.
- PISSART, A., 1964 — Contribution expérimentale à la genèse des sols polygonaux. *Ann. Soc. Géol. Belge*, t. 87, n° 7; p. 213—223.
- PISSART, A., 1966 — Expériences et observations à propos de la genèse des sols polygonaux triés. *Revue belge Géogr.*, t. 90, fasc. 1; p. 1—20.
- PISSART, A., 1969 — Le mécanisme périglaciaire dressant les pierres dans le sol. Résultats d'expériences. *C. R. Ac. Sc. 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., 1973 — Résultats d'expériences sur l'action du gel dans le sol: a) l'origine des cailloux dressés, b) les pressions développées dans le sol au moment du gel. *Biul. Peryglacjalny*, No. 23; p. 101—113.
- PISSART, A., 1972 — Variations de volume de sols gelés subissant des fluctuations de température sous 0°C. *Publication du Centre de géomorphologie du CNRS, Caen, Bulletin n° 13—14—15*; p. 19—33.
- PISSART, A., 1972 — Le laboratoire périglaciaire de l'Université de Liège. Processus périglaciaires étudiés sur le terrain. *C. R. Symposium intern. de Géomorphologie Liège—Caen, 1 au 9 juillet 1971 — Les Congrès et Colloques de l'Université de Liège, 1972*; p. 335—339.
- TRICART, J., 1956 — Etude expérimentale du problème de gélivation *Biul. Peryglacjalny*, No 4; p. 285—318.

ANDRÉ JOURNAUX*

Directeur, Centre de Géomorphologie

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE,
CENTRE DE GÉOMORPHOLOGIE À CAEN

COMITÉ DE COORDINATION POUR LES RECHERCHES PÉRIGLACIAIRES

1. *Nom du laboratoire:* Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen Adresse: Rue des Tilleuls
14000 Caen — Tel. (31) 81—88—00
Année de création: 1964

2. *But ou Intitulé général des recherches*

- a) étude des processus de désagrégation mécanique et de décomposition chimique des roches sous les différents climats reconstitués en milieu artificiel et contrôlé;
- b) recherches sur les produits d'altération constituant les formations superficielles;
- c) construction de modèles réduits en vue de l'analyse des processus de transport et d'érosion par les eaux courantes, le gel, etc.

3. *Administration*

- Nom du Directeur actuel: ANDRÉ JOURNAUX
(titres) Directeur du Centre de Géomorphologie à Caen, Professeur de Géographie à l'Université de Caen
- Organisation administrative: Centre National de la Recherche Scientifique, Ministère de l'Education Nationale.

4. *Personnel*

- Nombre de Chercheurs: 4
- Nombre d'Ingénieurs et de Techniciens Supérieurs: 13
- Nombre de Techniciens, Administratifs et Ouvriers de service: 21

5. *Matériel*

- Budget (1974)
 - Fonctionnement annuel (non compris les salaires) 406 000,00 FF
 - Salaires annuels (toutes charges comprises) 1 494 000,00 FF
 - Total 1 900 000,00 F
- = environ 380,000 US \$ français
- Principales installations et gros appareils: caisson pour le gel, 2 grands modèles de sol gelé (25 m³ chacun); tunnel routier de 20 m × 8 m; 2 chambres pour la gélifraction de 3 000 échantillons (−40°C)

* Université de Caen, Caen (Calvados), France.

6. Orientation actuelle des recherches

Après l'étude de la progression du front de gel et la formation de lentilles de glace, on envisage plus particulièrement les effets mécaniques, la mesure des contraintes au moment du gel et les effets de congélation sur des pentes au moment du dégel.

7. Publications propres au laboratoire

— Bulletins de Centre de Géomorphologie

- N° 1 — Présentation du Centre de Géomorphologie par André JOURNAUX — Mai 1967
- N° 4 — Présentation des cartes des Formations Superficielles et des cartes géomorphologiques de Basse-Normandie au 1/50 000e (feuille de Mézidon) par André JOURNAUX — Décembre 1969
- N° 5 — Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie. I — Calcaires des Charentes par Yves GUILLIEN et Jean-Pierre LAUTRIDOU — Février 1970
- N° 6 — Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie. II — Calcaires de Normandie et de Provence, par Jean-Pierre COUTARD, Pierre GABERT, Michel HELLUIN, Jean-Pierre LAUTRIDOU, Joël PELLERIN — Mai 1970
- N° 9 — Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie. III — Grès variés et roches volcaniques du Massif Central par Monique MAINGUET-MICHEL, Jean-Pierre LAUTRIDOU, Joël PELLERIN, Guy KIEFFER — Février 1971
- N° 10 — Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie. IV — Schistes, grès et roches métamorphiques de Basse-Normandie par Jean-Pierre COUTARD, Jean-Pierre LAUTRIDOU, Jean-Pierre BENOIST, V — Conclusions générales par Jean-Pierre LAUTRIDOU — Mai 1971
- N° 11 — Cartes des Formations Superficielles et cartes géomorphologiques de Basse-Normandie au 1/50 000e (feuille de Caen) — Juin 1971
- N° 12 — Etude mathématique des phénomènes de thermoclasticité et de cryoclasticité par Horace BERTOUILLE — Février 1972
- N° 13-14-15 — Etude des phénomènes périglaciaires en laboratoire. Colloque International de Géomorphologie (Liège-Caen 1971). Mai-Novembre 1972
- N° 17 — Présentation des cartes des Formations Superficielles et des cartes géomorphologiques de Basse-Normandie au 1/50 000e (feuille de Bayeux-Corseulles). Novembre 1973
- N° 19 — Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie. VI — Nouveaux résultats sur les faciès calcaires par Jean-Pierre LAUTRIDOU, Yves GUILLIEN, Jean-Pierre COUTARD, etc. Novembre 1974

— Autres publications:

Compte rendus des communications aux Congrès INQUA de Paris 1969, Christchurch 1973; Congrès International de Géographie Montréal 1972; Rapports du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées; Bulletins de liaison des laboratoires routiers des Ponts et Chaussées (Paris).

PRESENTATION DU CENTRE DE GÉOMORPHOLOGIE

Le Centre de Géomorphologie du Centre National de la Recherche Scientifique a été créé à Caen en 1964. Il a pour buts:

1° l'étude des processus de désagrégation mécanique et de décomposition chimique des roches sous les différents climats reconstitués en milieu artificiel et contrôlé;

2° des recherches sur les produits d'altération constituant les formations superficielles;

3° la construction de modèles réduits en vue de l'analyse des processus de transport et d'érosion par les eaux courantes, le gel, etc.

Une partie des recherches menées dans ce Centre par 12 Chercheurs et Ingénieurs et 26 Techniciens a pour but l'étude en laboratoire des phénomènes périglaciaires. Deux halls d'expériences accueillent différents modèles: deux cuves de 25 m³ chacune sur lesquelles se poursuivent des recherches sur la congélation des sols; deux chambres froides sont prévues pour 2 000 échantillons soumis à la cryoclastie; des enceintes thermiques plus petites sont destinées à fixer les protocoles ou à faire subir à un bloc de granite de 3 Tonnes des alternances de gel et de dégel; enfin, dans un tunnel long de 20 m et large de 9 m, une route en vraie grandeur est également soumise aux effets du gel, et doit, dans un avenir prochain accueillir un bac inclinable à volonté pour analyser les mécanismes de la solifluction. Des laboratoires d'analyses diverses (granulométrie, analyses chimiques, diffractométrie des argiles, minéraux lourds, etc.) et des services généraux (bibliothèque, laboratoire de photographie, garage, etc.) complètent les installations du Centre.

PROGRAMMES DE RECHERCHE ET PROJETS

EXPÉRIENCES DE CRYOCLASTIE

Deux chambres froides, pouvant atteindre -35°C , sont conçues pour recevoir par chariots de 100, environ 2,000 échantillons de 1 à 2 kg, dans des bacs où de l'eau maintenue en permanence et qui recueillent les débris de la gélifraction. Les protocoles de gel varient: gel progressif jusqu'à -5°C ou gel brutal à -30°C , représentant deux types classiques de climats, l'islandais et le sibérien.

Différents faciès de roches ont été étudiés: craie, calcaires (détritiques, récifaux, oolithiques, lacustres), silex, schistes, grès conglomérats, roches cristallines éruptives ou métamorphiques.

Chaque type de roche, représenté par au moins 10 échantillons, est soigneusement analysé avant l'expérience (porosité, poids sec, volume apparent, poids après immersion dans l'eau, poids après immersion progressive sous vide, volume total des pores et leur granulométrie). Poursuivis généralement sur plusieurs années, les expériences ne totalisent pas moins de 150 alternances gel-dégel, et parfois un millier.

Au cours d'une première phase de recherches, il a été procédé à un traitement statistique des roches pour établir une échelle de gélivité, et une étude des migrations de l'eau pendant le gel et le dégel d'après la taille et le nombre des pores, l'extrusion de l'eau et de la glace pendant le gel, la cryosuccion, l'ascension capillaire, la perméabilité, la teneur en eau. La vitesse d'amenuisement par gélifraction est estimée par la mesure des débris, dont on déduit la broyabilité de la roche.

Les premiers résultats ont été publiés dans le *Bulletin du Centre de Géomorphologie*. On constate d'une façon générale que les expériences à -5°C , -15°C et

—30°C donnent des résultats identiques. Pour les roches calcaires, on a défini 5 types de comportement au gel; mais, pour les roches non calcaires le classement est plus difficile, la gélivité dépendant des qualités mécaniques de la roche, de la matrice et du ciment.

Actuellement, les expériences s'orientent vers l'étude des mécanismes du gel. La propagation du front de gel est irrégulière, et la fragmentation se produit en fin de gel: des jauges de contraintes doivent permettre de suivre ce phénomène avec plus de rigueur. Il semble notamment que le diamètre des pores ait une influence sur les changements de phase de l'eau contenue dans la roche.

EXPÉRIENCES DE SOLS GELÉS

Deux grands modèles de sols de 25 m³ chacun, une route de 16 m de longueur et 8 m de largeur et plusieurs caissons de petites dimensions sont soumis à des gels jusqu'à —35°C. Le froid est fourni par de l'air pulsé au-dessus des modèles; en outre, un des modèles contient à sa base un serpentín où circule un liquide refroidi (ce qui permet de laisser la partie supérieure dégelée en tout en maintenant un permafrost en profondeur). Le niveau d'eau est constamment surveillé; les températures, le front de gel, et les contraintes sont suivis au cours des expériences.

Les résultats des premières séries d'expériences sont très intéressants et viennent d'être publiés dans le *Bulletin du Centre de Géomorphologie*. Nous les résumons ici.

La progression du front de gel est régulière en milieu sec, mais saccadée en milieu humide, ces arrêts correspondant à la formation de lentilles de glace. La congélation de l'eau se produit au contact du front de gel et détermine un appel de l'eau contenue par les couches inférieures par effet de cryosuccion: une lentille de glace se forme, mais contribue à assécher les couches inférieures, interrompant le développement du phénomène. Le front de gel avance rapidement jusqu'à retrouver une couche humide, où se reconstitue une nouvelle lentille de glace.

Un gel doux est plus efficace qu'un gel brutal et rapide pour la formation des lentilles, puisque l'eau doit migrer vers le haut sans interruption.

La présence des lentilles de glace explique le gonflement du sol: il peut atteindre jusqu'à 17% dans des limons riches en eau. Les involutions et les cryoturbations observés dans les alluvions sont dues aux gonflements différentiels au cours du gel et à la présence des lentilles de glace.

La quantité d'eau libérée par le dégel est sans doute le résultat le plus intéressant de ces expériences. On a recueilli, au cours d'un seul dégel sur un modèle saturé, l'équivalent de 35,4 millimètres de précipitations. Ce résultat montre le rôle très important du ruissellement qui s'effectue brutalement et dans un laps de temps très court dans les régions semi-arides, comme on peut le constater au Nord de l'Arctique Canadien.

Enfin de nombreux effets mécaniques sont observés sur nos modèles: fentes de gel et de dessiccation, déformations dysharmoniques entre lits de granulométries différentes, soulèvements continus d'objets verticaux, etc.

Une seconde série d'expériences va être commencée en 1976. Les modèles sont reconstruits en vue de mesurer les contraintes qui se développent au moment du gel et d'étudier particulièrement les effets de congéfluction sur les pentes au moment du dégel. On envisage pour cela de construire dans le tunnel routier un plan inclinable à volonté de 16 mètres de longueur.

PUBLICATIONS DE CENTRE DE GÉOMORPHOLOGIE

Bulletins de Centre de Géomorphologie du CNRS intéressant les expériences citées dans l'article

- N° 1 — Présentation du Centre de Géomorphologie *par* André JOURNAUX, Mai 1967.
- N° 2 — Les loess de Saint-Romain et de Mesnil-Esnard *par* Jean-Pierre LAUTRIDOU, Mars 1968.
- N° 3 — Etude expérimentale de la décomposition des roches cristallines *par* Pierre BIROT, Juillet 1969.
- N° 4 — Présentation des cartes des Formations Superficielles et des cartes géomorphologiques de Basse-Normandie au 1/50 000e (feuille de Mézidon) *par* André JOURNAUX, Décembre 1969.
- N° 5 — Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie: I — Calcaires des Charentes *par* Yves GUILLIEN et Jean-Pierre LAUTRIDOU, Février 1970.
- N° 6 — Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie: II — Calcaires de Normandie et de Provence, *par* Jean-Pierre COUTARD, Pierre GABERT, Michel HELLUIN, Jean-Pierre LAUTRIDOU, Joël PELLERIN, Mai 1970.
- N° 7 — Dépôts pliocènes et quaternaires d'Hérouville-St-Clair, près de Caen (Calvados) *par* Joël PELLERIN, Jean-Pierre COUTARD, Michel HELLUIN, Jean-Claude OZOUF, Septembre 1970.
- N° 8 — Les loess de la Campagne de Caen *par* Jean-Pierre COUTARD, Michel HELLUIN, Jean-Pierre LAUTRIDOU, Jean-Claude OZOUF, Joël PELLERIN, Novembre 1970.
- N° 9 — Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie: III — Grès variés et roches volcaniques du Massif Central *par* Monique MAINGUET-MICHEL, Jean-Pierre LAUTRIDOU, Joël PELLERIN, Guy KIEFFER, Février 1971.
- N° 10 — Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie: IV — Schistes grès et roches métamorphiques de Basse-Normandie *par* Jean-Pierre COUTARD, Jean-Pierre LAUTRIDOU, Jean-Pierre BENOIST, V — Conclusions générales *par* Jean-Pierre LAUTRIDOU, Mai 1971.
- N° 11 — Cartes des formations superficielles et cartes géomorphologiques de Basse-Normandie au 1/50 000e (feuille de Caen), Juin 1971.
- N° 12 — Etude mathématique des phénomènes de thermoclastie et de cryoclastie, *par* Horace BERTOUILLE, Février 1972.
- N° 13 — 14-15 — Etude des phénomènes périglaciaires en laboratoire. Colloque International de Géomorphologie Liège-Caen 1971, Mai-Novembre 1972.

PUBLICATIONS EFFECTUÉES PAR LES CHERCHEURS ET COLLABORATEURS DU CENTRE DE GÉOMORPHOLOGIE DANS D'AUTRES REVUES

- 1965 — A. JOURNAUX: Contribution of the Geomorphological Center at Caen to the study of morphoclimatic processes. *Communication au VIIe Congrès International de l'I.N.Q.U.A.* Boulder et Denver, Colorado, U.S.A., 30 Août—5 Septembre, 1965.

- 1967 — TRAN LAN, A. DUPAS, J. P. COUTARD: Essais d'appareils de mesure dans une cuve de congélation du Centre de Géomorphologie du CNRS. *Rapport interne P.C.* — Centre de Géomorphologie.
Repris à la suite de nouveaux essais dans TRAN LAN, J. AGUIRRE-PUENTE, A. DUPAS: Essais de l'indicateur de profondeur de gel dans une cuve de congélation du Centre de Géomorphologie du CNRS. *Rapport commun au L.C.P.C. du Laboratoire d'Aérothermique et du Centre de Géomorphologie*, Octobre 1967.
- 1967 — J. AGUIRRE-PUENTE, B. LE FUR, S. VALLEMONT D. GERARD: Description et essais d'un appareil indiquant la profondeur de gel dans les sols par changement de coloration. *Bull. Liaison Lab. Routiers Ponts-et-Chaussées*, n° 28, Novembre—Décembre 1967; p. I—31 à I—48.
- 1969 — A. JOURNAUX: Intérêt des recherches du Centre de Géomorphologie de Caen pour l'étude du Quaternaire. *Communication au VIIIe Congrès International de l'I.N.Q.U.A.*, Paris, 1969.
- 1969 — P. GABERT et J. P. LAUTRIDOU: Gélifraction artificielle et gélifraction au cours du Quaternaire. *Méditerranée*, n° 3; p. 293—312.
- 1969 — J. AGUIRRE PUENTE et A. PHILIPPE, avec collaboration du Centre de Géomorphologie: Quelques recherches effectuées en France sur le problème de la congélation des sols. *Rev. Gén. de Thermique*, Vol. VIII, n° 96; p. 1123—1141, 12 fig. bibliogr.
- 1970 — A. PHILIPPE, J. AGUIRRE-PUENTE, H. BERTOUILLE: La station de gel de Caen. Présentation, première expérimentation; 21 p., 38 fig. et 12 photos h. t., édit. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- 1972 — A. PHILIPPE, J. AGUIRRE-PUENTE, H. BERTOUILLE: Etude en simulation des effets du gel sur les structures routières et leurs sols supports. *Bull. liaison Labor. Ponts et Chaussées*, n° 58; p. 49—61, 20 fig.
- 1972 — A. JOURNAUX: Simulations en laboratoire au Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen (France). Communication PO 163, p. 114—115, in *International Geography*, 1972, La Géographie Internationale, Communications présentés au 22e Congrès International de Géographie, Canada Montréal 1972, Univ. Toronto Press, 2 vol., 1354 p.

E. ASAHINA
Former Director

HOKKAIDO UNIVERSITY*
THE INSTITUTE OF LOW TEMPERATURE SCIENCE

1. *Name of laboratory:* The Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University
Address: N 19 W 8 Sapporo, Japan
Established on 1941
2. *Objective of researches:* Natural phenomena occurring in cold weather (snow, ice, sea ice, ground ice, cryobiology)
3. *Administration:*
Director, Prof. Duisuke KUROIWA
Organization: belongs to ministry of Education, Japanese Government
4. *Staff*
Number of researchers: 48
Number of engineers and technicians: 17
Number of office workers: 30
5. *Budget (1974)*

Function (without salaires)	.150,000,000 yen (about 500,000 \$)
Salaires	.200,000,000 yen (about 670,000 \$)

Research facilities: see report
6. *Current Projects:* see report
7. *Publications:* see report

GENERAL

The Institute of Low Temperature Science of Hokkaido University was established on November 25th, 1941. The purpose of the Institute was to study natural phenomena occurring at climatic low temperatures in Hokkaido from a view point of basic science.

The Institute now has eleven research sections: Physics, Applied Physics, Meteorology, Oceanography, Snow Damage, Frost Heaving, Snow Melt, Frost Injury in Plants, Biology, Medicine and Biochemistry. A number of laboratory experiments

*Sapporo, Japan 060.

involving the properties and behavior of substances and organisms are being carried out under both climatic and artificial low temperature conditions. A wide variety of field work has also been carried out in various locations over the globe from temperate to polar regions of both Arctic and Antarctica. The staff consists of more than ninety members including clerical and technical employees.

In this Institute frozen-ground research was mainly done in Frost Heaving Section. To date the investigations on the following subjects have been carried out both in the field and in the cold room; the change of soil moisture content during freezing, the microstructure of frozen soil, the growth process of ice columns (*shimo-bashira*) from the soil surface, the heaving force of the frozen ground, and the mechanical properties of the frozen soil. Recently research has mainly been directed towards the moisture movement through unfrozen soil and its dependence on the soil structure. For this purpose, a water resistant basin filled with frost susceptible soil of known properties has been constructed at Tomakomai, Hokkaido and field experiments under controlled conditions are being carried out. Also, in the laboratory the frost heaving of soil samples are being measured with special reference to crystal structure, the specific surface area and its porosity.

CURRENT PROJECTS IN FROST HEAVING SECTION

- The freeze-melting process of soil.
- Water migration in the soil during frost heaving.
- Heaving force of frozen ground.
- Thermal stress in frozen ground.
- Microstructure and mechanical property of frozen soil.
- Crystal structure and frost susceptibility of powder.
- Weathering of the rock in cold climates.

RESEARCH FACILITIES ATTACHED TO THE INSTITUTE

The Institute has three separate laboratories, the first for sea ice research in Mombetsu, the second for avalanche research in Toikanbetsu, and the third for frost heaving research in Tomakomai. Sea Ice Research Laboratory has a radar system for the sole purpose of ice observation, for first and the only one in the world. Three radar antennas were installed along the Okhotsk Sea coast of Hokkaido, i.e. from north to south, on Mt. Tokushibetsu (430 m above sea level) in Esashi, on Mt. Oyama (300 m) in Mombetsu, and at Cape Notoro (200 m) in Abashiri, to cover an area of 60—80 km in width along the entire coast line.

COLD ROOMS

In the laboratory building completed in March 1969, there are thirty-two cold rooms, which may be divided into four groups, i.e., the first floor block, the second

floor block, a wind tunnel room with an annex, and a large cold room, their floor areas being 125, 260, 157 and 86 m², respectively.

The first floor block consists of an entrance, a common preparatory room (45 m²), and eight small rooms (each about 8 m²) equipped with various kinds of testing machines, while the second floor block has an entrance, a common preparatory room (29 m²), two medium rooms (28 m² and 33 m²), and sixteen small rooms, of which two are installed with an X-ray diffractometer and a micro-beam X-ray apparatus, and two are for handling poisonous chemicals and are specially designed to meet the necessary safety conditions.

The wind tunnel room has a Göttingen type wind tunnel for studying the drift of snow. The tunnel has a cyclonic collector to prevent drifting snow to recirculate and has an observation space of 50×50×800 cm³. The maximum wind speed is 40 m/s.

Five R22 freezing machines made -28°C and -48°C brine (trichloroethylene, CHClCCl₂), which in turn are circulated through heat exchangers in the rooms to cool them down to -20°C and -40°C. An indirect cooling system has been adopted in order to ensure an easy control of room temperatures. Two small rooms on the second floor block have additional booster heat exchangers driven directly by an R13 freezing machine and can be cooled down to -60°C and -80°C, respectively. For the purpose of local cooling, there are brine outlets and inlets in the two medium room and the two X-ray rooms.

The room temperatures can be designated at the control panel in the controlling room and can be automatically maintained at ±1°C of the assigned temperatures.

The common preparatory rooms, the medium rooms, and the rooms for using poisonous chemicals can be forcibly ventilated with -20°C dry air, while small rooms are ventilated by natural convection through ventilation holes connecting them to the common preparatory rooms.

PUBLICATIONS

Results obtained by the investigations at the Institute of Low Temperature Science are published in Japanese with English summaries in the journal *Teionkagaku* (Low Temperature Science, physics series and biology series) and in English in *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*, series A (physics and geophysics) and series B (biology and medicine) both edited by the Institute. The latest publication was Vol. 32 for both the physics and biology series of the former, and series A No. 26 and series B No. 18 for the latter.

LOUIS LLIBOUTRY
Grenoble

LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE DU CNRS À GRENOBLE

1. *Nom du laboratoire*: Laboratoire de Glaciologie du CNRS

Adresse: 2, Rue Très Cloîtres, 38031 Grenoble — Cedex (France)

Année de création: 1964

2. *But ou intitulé des général recherches*

Glaciologie sous tous ses aspects

3. *Administration*

— Nom du Directeur actuel: Louis LLIBOUTRY

(titres) Professeur Univ. Sci. et Méd. de Grenoble (Géophysique)

— Organisation administrative:

Centre National de la Recherche Scientifique, Ministère de l'Education Nationale

4. *Personnel*

— Nombre de Chercheurs: 16

— Nombre d'Ingénieurs et de Techniciens Supérieurs: 6

— Nombre de Techniciens, Administratifs et Ouvriers de service: 14

5. *Matériel*

— Budget (1974)

— Fonctionnement annuel (non compris les salaires): 500 000 FF

— Salaires annuels: —

— Principales installations et gros appareils: Chambres froides (0° à -45°C), puits à glace de 28 m, chambres sans poussières, à bas niveau de radioactivité, 1. simulateurs de glacier (2^e en construction)

6. *Orientation actuelle des recherches*

1) Dynamique de glaciers

2) Déformation de la glace tempérée

3) Géochimie des glaces polaires pour études paléoclimatologiques

4) Transferts d'énergie air—sol

5) Génèse des précipitations (noyaux glaçogènes)

7. *Publications propres au laboratoire*

— Bulletins

Autres Publications: Une trentaine de thèses et environ 150 autres publications en 15 ans.

L. W. GOLD
Assistant Director

NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF CANADA*,
DIVISION OF BUILDING RESEARCH

GEOTECHNICAL SECTION

1. *Name of laboratory:* Geotechnical Section, Division of Building Research, National Research Council Canada
Address: Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada
Year of establishment: The Division of Building Research was established in 1947; the work on permafrost and frozen ground was begun in 1950.
2. *Objective and general title of research:* Investigations on fundamental and engineering aspects of permafrost and frozen ground.
3. *Administration:*
The Director of the Division of Building Research is Mr. C. B. CRAWFORD;
the Assistant Director is Dr. L. W. GOLD;
the Head of the Geotechnical Section is Mr. E. PENNER;
the Assistant Head of the Geotechnical Section is Mr. G. H. JOHNSTON.
4. *Staff:*
Number of Research Officers (involved in this work): 5
Number of Technicians: 6
Secretarial Staff: 1
5. *Budget:* Information not available
6. *Present research:* see report.

GENERAL

The Division of Building Research has had for many years an active research program concerning both seasonally and perennially frozen ground (permafrost). This activity has included both laboratory studies and field investigations. Particular attention has been given to the fundamental aspects of frost action, the distribution of permafrost in Canada and the factors that control it and its characteristics,

* Ottawa, Canada

the proper construction practices to be used for seasonal frost (frost-susceptible soils) and permafrost areas, and the performance of structures built on frozen ground. Discovery of petroleum in the Arctic has greatly increased the significance and importance of this work. The urgent need for the information required in order to move, construct and operate in an acceptable manner in permafrost regions has had an important influence on the Division's frozen-ground research program in recent years.

SUMMARY OF RESEARCH PROJECTS

GROUND THERMAL REGIME

The ground thermal regime in areas of seasonal frost and permafrost can be very sensitive to changes that are imposed on the surface by natural or man-made events or activities. It is important that modification to the ground thermal regime due to these changes be predictable, particularly if they can result in unacceptable heaving or thawing of frozen ground. The mathematical equations that describe such changes are non-linear because of phase changes, movement of water and heaving and settlement during the freezing and thawing process, and the temperature, water content and soil type dependence of the thermal properties. These equations, therefore, are not easily solved and considerable attention is being devoted to their solution by numerical methods using computers.

The Geotechnical Section is developing a one-dimensional finite-difference program for the solution of ground thermal problems. This program can take into account phase changes, temperature-dependent thermal properties, multilayered systems and a variety of surface boundary conditions. It is being used for theoretical investigations as well as for model comparisons with ground temperature data obtained from other projects being carried out by the Section, including studies of frost penetration under ice rinks, cold storage plants and roads in seasonal frost areas; and investigations of the ground thermal regime under buildings, airstrips, and roads and in natural conditions in permafrost areas.

Measurements of the thermal conductivity of frozen and thawed soils are being made as knowledge of the thermal properties of soils is most important for ground temperature calculations. A cylindrical thermal conductivity probe, developed by the Section for use in both laboratory and field studies has been improved. The early model was 40 cm long and 1 cm in diameter; the new model is 50 cm long and has a diameter of 3 mm. The laboratory version uses a thermocouple read by a sensitive digital voltmeter and is capable of resolving temperature changes as small as 0.001 K. Slightly coarser resolution is obtained with the field version which uses a thermistor read by an inexpensive digital multimeter. The field equipment is sufficiently simple to allow operation by relatively inexperienced personnel. Because of the small increase in temperature required for measurements, errors due to ther-

mally induced migration of water are minimized; the probe can be used in frozen soils at a temperature close to 0°C.

Laboratory measurements of the thermal conductivity of coal, CuS and ZnS ore samples and Mackenzie Valley soils, and subsequent calibration tests have proven the probe to be a practical and dependable instrument. The field version will be used for *in situ* conductivity monitoring at Ottawa, Ontario; Thompson, Manitoba and at a site on the Mackenzie Highway, Northwest Territories.

The influence of embankments on the ground thermal regime is a prime consideration in the design and construction of roads, airstrips, and railways in permafrost areas. Ground temperature observations have been made at the Inuvik airstrip since 1957 to evaluate the effect of a thick crushed rockfill. When the surface was paved in 1969, additional instrumentation was installed to monitor ground temperature and heat flow and thus determine the influence of the newly established surface conditions. The results of this work are being prepared for publication.

A field program to monitor the thermal performance of an uninsulated embankment in the discontinuous permafrost zone (on the Mackenzie Highway near Wrigley, N.W.T.) is in the initial planning stages. In addition to temperature and displacement measurements, the thermal properties of the fill will be measured periodically.

There is considerable interest in the use of insulation to prevent either the freezing of frost-susceptible soils or the thawing of permafrost. The Section has studied the effectiveness of polystyrene and polyurethane insulation in preventing damage to roads due to frost action. In 1972 it undertook a joint program with several Canadian government departments to evaluate the use of insulation in preventing the thawing of permafrost under northern roads. Very thick fills are required in permafrost areas to prevent unacceptable thermal disturbance of the underlying perennially frozen ground, particularly over ice-rich materials. The proper use of insulation should permit a decrease in roadbed thicknesses and thus provide a significant saving in cost, particularly in regions where there is a limited supply of suitable road-building materials.

The study is being carried out on the Mackenzie Highway near Inuvik, N.W.T. The Section planned and installed several test sections and associated ground temperature cables in April and September of 1972. Ground temperatures and roadbed movements will be measured regularly for at least five years to assess thermal changes and the performance of the test sections.

A field study to evaluate the effect of thermo-syphons on the ground thermal regime has been conducted by the Section at test sites in Ottawa and Thompson. Field studies of the influence of piles and steel posts in conducting heat to and from the ground in seasonal frost and permafrost areas have also been undertaken.

FROST ACTION

Laboratory investigations by the Geotechnical Section on the factors associated with the heaving of freezing ground have provided useful information on the dependence of heaving rates and pressure on grain size, pore size and rate of heat extra-

ction. They have demonstrated the complementary role of overburden pressure and pore water pressure in the frost-heaving process. From this early work, an understanding was gained of the factors controlling the state of water in frozen ground. It demonstrated the effect of soil particle size, and therefore surface area, on the temperature dependence of the unfrozen water content of soils at a temperature below 0°C.

Over the past few years, attention has been given to relating the results of this laboratory work to the behaviour of naturally freezing ground. Field investigations were undertaken at Ottawa to determine the uplift and bearing pressures exerted on cylindrical piles, long straight walls and flat plates during freezing of frost-susceptible soils. They are now being continued at Thompson, Manitoba, located in the discontinuous permafrost zone, in order to determine the forces that can develop under more severe climatic conditions. Nine steel piles and instrumentation for measuring temperatures and uplift forces due to the surrounding soil have been installed. Observations were begun in October 1972; initial results indicated that the uplift forces were appreciably greater than those observed in the previous studies at Ottawa. Observations are continuing and it is planned to expand this study to include concrete piles, wood piles and concrete walls.

PERMAFROST CHARACTERISTICS

Studies are under way to delineate the boundary between the discontinuous and continuous permafrost zones across Canada, to investigate alpine permafrost in Western Canada, and to establish the factors controlling the characteristics of permafrost, particularly the thermal characteristics, at a given site.

Ground temperatures are being measured to various depths down to 15 m in northern Manitoba and Keewatin District across the discontinuous and continuous permafrost zones. Thermocouple and thermistor cables have been installed on mountain summits in southern Alberta and southern British Columbia as part of a study of permafrost conditions in the Western Cordillera. The observations made to date show how ground temperature depends on the type of terrain and surface cover in a region.

The factors controlling the temperature of the ground have now been studied for five years at Thompson, Manitoba. Measurements are being made, at four adjacent sites, of ground temperature, air temperature, net radiation, wind speed, precipitation, snow depth and density and heat flow from the ground. Two of the sites have permafrost and two do not. These observations are providing useful information on the effect of surface cover and surface conditions on the ground thermal regime.

THAW-SETTLEMENT INVESTIGATIONS

A problem of great current interest is the settlement that results from the thawing of ice-rich permafrost. This problem is particularly relevant to stability considera-

tions for structures such as dykes and buried hot pipelines in permafrost areas. Cooperative field studies with Manitoba Hydro are under way to evaluate the design and performance of dykes constructed on thawing permafrost at several hydro power developments in northern Manitoba. In addition, the Section participated with Mackenzie Valley Pipe Line Research Ltd. in a study of temperatures, pore water pressures and settlement at a buried hot oil pipeline test loop at Inuvik, N.W.T.

A laboratory study, including the development of apparatus and test procedures, was begun in 1972 to investigate the behaviour of frozen ground on thawing. The objectives were to determine the dependence of pore pressure dissipation (and, therefore, the strength of thawed frozen soil) on ice content, rate of thawing and soil type; and to relate the total settlement characteristics to ice content and soil type. A plastic cylinder, which held frozen soil samples about 8 cm in diameter and 8 cm in height and could be placed in a consolidometer in a cold room, was developed. The samples are caused to thaw unidirectionally at a controlled rate by a specially designed heater mounted on top of the sample. Temperatures are monitored at various levels within the specimen. Techniques for measuring pore water pressures at various levels in the thawed part of the sample are being developed. The apparatus was designed to measure both total and rate of settlement. Some preliminary tests have been run but the work has now been postponed temporarily.

STRENGTH OF FROZEN GROUND

The strength and, in particular, the creep behaviour of frozen ground are of prime importance to the engineer. A unified engineering theory of time-, temperature- and normal pressure-dependent deformation and strength of frozen soils has been developed and compared with theories and available experimental information. In addition to a theoretical approach, there has been a real need for the development of field methods and equipment for the *in situ* determination of the rheological properties of frozen soils. A research project was undertaken in 1971, therefore, to investigate the suitability of the Ménard pressuremeter for this purpose. Field tests were carried out in permafrost at Thompson and the equipment, with minor modifications, performed successfully. In addition, methods developed for determining short-term strength and creep parameters from the pressuremeter test data proved adequate for predicting long-term strength.

The behaviour of frozen soil when subjected to uplift forces and, in particular, the displacements associated with long-term creep were investigated by a field study of grouted rod and power-installed screw anchors in permafrost at Thompson, Manitoba. The engineering creep theory was used to relate the time-dependent behaviour of anchors to the basic creep parameters of the frozen soil. In addition, it was shown how the field creep data can be used to estimate the long-term strength of the bond between a grouted rod anchor and frozen soil. A method of analysis that allows test data to be used directly for design, based on secondary creep rates and allowable displacements, was developed for the screw anchors. A modification

of the creep theory, confirmed by the screw anchor tests, was used to describe the behaviour of circular footings in frozen ground.

A program of creep testing of various frozen soils in the Section's cold rooms was begun in 1974 to evaluate their behaviour under long-term loading and different temperatures and to verify the theoretical methods of analysis previously developed. Artificially frozen soils are being used during the first phase of this program for control purposes. Naturally frozen soils obtained from the field will be used in the second phase. Procedures for taking and preserving samples in the field, transporting samples at controlled temperatures and preparing samples in the laboratory were investigated and the methods and equipment used by others for the preparation of samples for testing in the laboratory, reviewed. Equipment and procedures for creep testing of frozen soils in the laboratory are being developed in conjunction with this program. Model studies of foundations (piles, piers, footings, etc.) in frozen ground will be started in the Section's cold rooms in 1976 as a further extension of the evaluation of the creep behaviour of frozen soils.

BIBLIOGRAPHY

- BAKER, T. H. W. — Transportation, preparation and storage of frozen soil samples for laboratory testing. Presented at the ASTM Symposium on the Preparation of Specimens for Laboratory Testing — The Effects on Test Results, Montreal, 22–27 June 1975.
- BROWN, R. J. E. — Permafrost map of Canada. *Canadian Geographical Journal*, 1968, p. 56–63 (NRCC 10326).
- BROWN, R. J. E. — Characteristics of the active layer in the permafrost region of Canada. *National Research Council of Canada, Assoc. Com. Geotech. Res., Tech. Memo.* 103, March 1972, p. 1–7.
- BROWN, R. J. E. — Permafrost investigations on Devon Island, N.W.T. — Canadian Tundra Biome Study Site (IBP). Devon Island IBP Project, High Arctic Ecosystem, Dept. of Botany, University of Alberta, Project Report of 1970 & 1971, published 1972, p. 30–45.
- BROWN, R. J. E. — Permafrost in the Canadian Arctic Archipelago. *Annals of Geomorphology*, July 1972, p. 102–130 (NRCC 12805).
- BROWN, R. J. E. and WILLIAMS, G. P. — The freezing of peatland. *National Research Council of Canada, Division of Building Research, Tech. Paper* 381, Ottawa, 1972 (NRCC 12881).
- BROWN, R. J. E. — Permafrost — distribution and relation to environmental factors in the Hudson Bay Lowland. Proceedings Symposium on the Physical Environment of the Hudson Bay Lowland, Univ. of Guelph, Ontario, p. 35–68, 1973 (NRCC 13574).
- BROWN, R. J. E. — Some aspects of airphoto interpretation of permafrost in Canada. *National Research Council of Canada, Division of Building Research, Tech. Paper* 409, Ottawa, February 1974 (NRCC 13804).
- BROWN, R. J. E. — Influence of climatic and terrain factors on ground temperatures at three locations in the permafrost region of Canada. *Proceedings, Second International Conference on Permafrost (North American contribution), Yakutsk, Siberia*, 1973, p. 27–34 (NRCC 13844).
- BROWN, R. J. E. and T. L. PÉWÉ — Distribution of permafrost in North America and its relationship to the environment: a review, 1963 to 1973. *Proceedings, Second International Conference on Permafrost (North American Contribution), Yakutsk, Siberia*, 1973, p. 71–100 (NRCC 13847).

- BROWN, R. J. E. — Permafrost. (Map published in National Atlas of Canada). Dept. of Energy, Mines and Resources, Ottawa, 1973, Map MCR 1116, p. 11–12.
- BROWN, R. J. E. — Muskeg and permafrost. Muskeg Subcommittee. National Research Council of Canada, Assoc. Com. Geotech. Res., Ottawa. To be published in "Muskeg and the Northern Environment" by University of Toronto Press.
- BROWN, R. J. E. — Ground ice as an initiator of landforms in permafrost regions. *Proceedings, Third Guelph Symposium on Geomorphology*, 1973; p. 25–42 (NRCC 14554).
- BROWN, W. G. and JOHNSTON, G. H. — Dikes on permafrost: predicting thaw and settlement. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 7, N° 4, November 1970, p. 356–371 (NRCC 11540).
- CRAWFORD, C. B. and JOHNSTON, G. H. — Construction in permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 8, n° 2, 1971, p. 236–251 (NRCC 11843).
- GOLD, L. W., JOHNSTON, G. H., SLUSARCHUK, W. A. and GOODRICH, L. E. — Thermal effects in permafrost. *Proceedings, Canadian Northern Pipeline Research Conference, National Research Council of Canada, Assoc. Com. Geotech. Res., Tech. Memo. 104*, p. 25–45. Ottawa, 1972 (NRCC 12716).
- GOLD, L. W. and LACHENBRUCH, A. H. — Thermal conditions in permafrost: a review of North American literature. *Proceedings, Second International Conference on Permafrost (North American contribution)*, Yakutsk, Siberia, July 1973, p. 3–35 (NRCC 13846).
- GOODRICH, L. E. — Fortran IV program for general one-dimensional geothermal problems. *National Research Council of Canada, Division of Building Research, Computer Program 39*, Ottawa. May 1974.
- GOODRICH, L. E. — A one-dimensional numerical model for geothermal problems. *National Research Council of Canada, Division of Building Research, Tech. Paper 421*, Ottawa. June 1974 (NRCC 14123).
- HNATIUK, J. and JOHNSTON, G. H. — Environmental conditions influencing Arctic decisions and design criteria. *Proceedings Fifth International Congress of the Fondation Française d'Etudes Nordiques*, held at Le Havre, France, 2–5 May 1973, *Contributions du Centre d'Etudes Arctiques XII*, vol. 1, p. 11–35, August 1975.
- JOHNSTON, G. H. — Dikes on permafrost, Kelsey generating station, Manitoba. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 6, No. 2, May 1969, p. 139–157 (NRCC 10611).
- JOHNSTON, G. H. and LADANYI, B. — Field Tests of Grouted Rod Anchors in permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 9, No. 2, May 1972, p. 176–194 (NRCC 12404).
- JOHNSTON, G. H. and LADANYI, B. — Field Tests of deep, power-installed screw anchors in permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 11, No. 3, August 1974, p. 348–358 (NRCC 14012).
- LADANYI, B. — An engineering theory of creep of frozen soils, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 9, No. 1, February 1972, p. 63–80 (NRCC 12425).
- LADANYI, B. and JOHNSTON, G. H. — Evaluation of in-situ creep properties of frozen soils with the pressuremeter. *Proceedings, Second International Conference on Permafrost (North American Contribution)*, Yakutsk, Siberia, July 1973, p. 310–318 (NRCC 13845).
- LADANYI, B. and JOHNSTON, G. H. — Behaviour of circular footings and plate anchors embedded in permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 11, No. 4, November 1974, p. 531–553 (NRCC 14269).
- LARKIN, B. S. and JOHNSTON, G. H. — An experimental field study of the use of two-phase thermosiphons for the preservation of permafrost. *Engineering Journal*, vol. 57, May/June 1974, p. 33–47.
- LINELL, K. A. and JOHNSTON, G. H. — Engineering design and construction in permafrost regions. *Proceedings, Second International Conference on Permafrost (North American Contribution)*, Yakutsk, Siberia, July 1973, p. 553–575 (NRCC 13848).

- PENNER, E. — Thermal conductivity of saturated Leda clay. *Géotechnique*, Vol. XII, No. 2, June 1962, p. 168–175 (NRCC 6903).
- PENNER, E. — Experimental pavement structures insulated with polyurethane and extruded polystyrene foam. *Proceedings, Second Conference on Low Temperature Science, Sapporo, Japan*, vol. 1, Pt. 2, 1967, p. 1311–1322 (NRCC 10384).
- PENNER, E. — Frost heaving forces in Leda clay. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 7, No. 1, 1970, p. 8–16 (NRCC 11131).
- PENNER, E. and GOLD, L. W. — Transfer of heaving forces by adfreezing to columns and foundation walls in frost-susceptible soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 8, No. 4, 1971, p. 514–526 (NRCC 12177).
- PENNER, E. — Soil moisture redistribution by ice lensing in freezing soils. *Proceedings, 17th Annual Meeting Can. Soc. Soil Science, Lethbridge, Alberta, 4–8 July 1971*, 1972, p. 44–62 (NRCC 12640).
- PENNER, E. — Influence of freezing rate on frost heaving. *Highway Res. Board, Highway Research Record* No. 393, 1972, p. 56–64 (NRCC 12868).
- PENNER, E. — Frost heaving pressures in particulate materials. OECD Symposium “Frost Action on Roads”, Oslo, October 1–3, 1973 (NRCC 13674).
- PENNER, E. — Uplift forces on Foundations in frost heaving soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, No. 3, August 1974, p. 323–338 (NRCC 14001).
- PENNER, E., JOHNSTON, G. H. and GOODRICH, L. E. — Thermal conductivity laboratory studies of some MacKenzie Highway soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 12, No. 3, August 1975, p. 271–288 (NRCC 14707).
- SEDZIAK, H. P., SHIELDS, J. H. and JOHNSTON, G. H. — Condition of timber foundation piles at Inuvik, N.W.T. *Department of the Environment, Ottawa, Canadian Forestry Service, Information Report OP-X-67*, December, 1973.
- SLUSARCHUK, W. A. and FOULGER, P. H. — Development and calibration of a thermal conductivity probe apparatus for use in the field and laboratory. June 1973 (NRCC 13267).
- SLUSARCHUK, W. A. and WATSON, G. H. — Thermal conductivity of some ice rich permafrost soils. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 12, No. 3, August 1975, p. 413–434 (NRCC 14830).
- SLUSARCHUK, W. A., *et al.* — Instrumentation around a warm oil pipeline buried in permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 10, May 1973, p. 227–245 (NRCC 13194).
- WATSON, G. H., SLUSARCHUK, W. A. and ROWLEY, R. K. — Determination of some frozen and thawed properties of permafrost soils, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 10, No. 4, Nov. 1973, p. 592–606 (NRCC 13950).
- WATSON, G. H., ROWLEY, R. K. and SLUSARCHUK, W. A. — Performance of a warm-oil pipeline buried in permafrost. *Proc. Second International Conference on Permafrost (North American Contribution)*, Yakutsk, Siberia, July 1973, p. 759–766 (NRCC 13966).
- WILLIAMS, G. P. — Surface Heat Exchange and Permafrost. *National Research Council of Canada, Assoc. Com. Geotech. Res., Tech. Memo. 103*, p. 8–12, 1972.
- WILLIAMS, P. J. — Unfrozen water content of frozen soils and soil moisture suction. *Géotechnique*, vol. 14, 1964, p. 231–246 (NRC 8259).

A. L. WASHBURN
Director

UNIVERSITY OF WASHINGTON
QUATERNARY RESEARCH CENTER
PERIGLACIAL RESEARCH LABORATORY

1. *Nom du laboratoire*: Periglacial Research Laboratory

Adresse: Quaternary Research Center, AK-60, University of Washington, Seattle, Washington 98195

Année de creation: 1973

2. *But ou intitulé général des recherches*

Frost-action research

3. *Administration*

— Nom du Directeur actuel: A. L. WASHBURN

— Organisation administrative: Quaternary Research Center, University of Washington

4. *Personnel*

— Nombre de Chercheurs: 2 (Full time), 4 (Part time)

— Nombre d'Ingénieurs et de Techniciens Supérieurs (Included above)

— Nombre de Techniciens, Administratifs et Ouvriers de service: 2

5. *Matériel*

— Budget (1974)

— Fonctionnement annuel (non compris les salaires): ca. \$ 20,000

— Salaires annuels: ca. \$ 50,000

— Principales installations et gros appareils: 3 cold rooms (one to -20°C ; two to -50°C .
Tilting slab (ce $2\frac{1}{2} \times 4\frac{1}{2}$ m) for slope stability experiments

6. *Orientation actuelle des recherches*

— Frost-sorting effects

— Origin of selected patterned-ground features

— Frost creep and solifluction

7. *Publications propres au laboratoire*

— Bulletins — None

— Autres Publications — None

(Eight internal reports have been assembled dealing with procedures and preliminary experiments)

GENERAL

The Periglacial Research Laboratory was constructed in 1972-73 as part of a National Science Foundation, University Science Development Grant, to the

University of Washington. The laboratory includes three cold rooms: (1) a storage facility that can also serve as an additional laboratory, with a temperature capability of -50°C ; (2) a general purpose laboratory with a temperature capability of -20°C ; and (3) a more specialized laboratory with a temperature capability of -50°C . There are several other laboratories in addition to the cold rooms, and almost all the rooms are equipped with hot and cold brine lines to permit controlled temperatures down to -50°C for box experiments.

The specialized laboratory contains a tilting slab, measuring slightly less than 3×5 m, that can carry a 1-m thickness of soil. The slab tilts to an angle of about 45° , and the base has its own controlled refrigeration system to simulate a permafrost table. The refrigeration system utilizes R22 and trichloroethylene brine. The laboratory has been tested, the main trouble to date being leaking brine pumps.

RESEARCH

Experiments will be started shortly. An interdisciplinary team consisting of Professors Mehmet SHERIF (College of Engineering), Fiorenzo UGOLINI (College of Forest Resources) and A. L. WASHBURN (College of Arts and Sciences) will be responsible for integrating the soil mechanics, soil chemistry, and geomorphic aspects of the work. It is anticipated that Professor Akira HIGASHI of Hokkaido University and other visiting researchers will be cooperating in the program. Initial research will emphasize use of the tilting slab and will focus on frost creep and solifluction, frost sorting, and the origin of various forms of patterned ground. The work is supported by the National Science Foundation and the Army Research Office.

DUWAYNE ANDERSON
Chief, Earth Sciences Branch

DEPARTMENT OF THE ARMY
COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LABORATORY*

1. U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory

Address: Box 282, Hanover, New Hampshire, 03755, USA.
Year Established: 1961

2. *Mission:*

As the Army Laboratory for science and technology in the cold environments of the world, CRREL conducts and coordinates research and develops technology applicable to the Army's needs in those geographic areas of the world where cold presents a severe problem at least one year in ten. In accomplishing this mission the Laboratory:

a. Conducts research, investigations, and engineering studies pertaining to development of new and improved techniques, materials, and criteria for planning, design, construction, and maintenance of permanent and expedient facilities in cold environments;

b. Conducts research and engineering studies pertaining to the design of materiel introduced to cold environments.

3. *Administration*

COL Robert L. CROSBY, Commander and Director

Dr. D. R. FREITAG, Technical Director

USACRREL is a field operating activity of the U. S. Army Corps of Engineers.

4. *Personnel and Budget*

(FY 1975)			
Professional Staff	111	Annual Operating	US \$ 4.5 million
Technical Support Staff	78	(less salaires)	
Administrative Staff	72	Annual Salaires	US \$ 3.5 million
Total	261	Total	US \$ 8.0 million

5. *Facilities*

Principal facilities of CRREL are located on 24 acres of land in Hanover, New Hampshire. The main laboratory building and adjoining support buildings consist of 130,000 square feet not including a laboratory addition of 46,000 square feet, which will be completed and occupied in 1976.

Field work in Alaska is conducted in the Fairbanks area on over 700 acres of government-owned or leased land. Included in the Alaskan facilities is a 360-foot tunnel into permafrost.

Twenty-four cold rooms ranging up to 25 × 27 feet form the core of a specialized laboratory complex designed for mechanical, chemical and physical testing and experimentation of all kinds. Data acquisition, analysis and computation are accomplished via an in-house computer and by direct link with a large time-sharing computer center. Facilities for analyzing satellite-acquired information are also being developed.

* Hanover, New Hampshire.

A planned ice engineering facility will allow studies, in miniature, of the problems ice causes in rivers, navigational locks and facilities, and hydropower and flood control structures.

Specialized equipment includes an electron microscope with magnification power of 300,000; a coupled gas chromatograph-mass spectrometer with an electronic data processor; a 300,000—1b hydraulic press to study compressive strength of rocks and soil samples; a closed loop, electro-hydraulic testing system to measure compressive and tensile strength of materials (force capability of 50 micro-inches per minute to 1,000 inches per minute).

6. Laboratory Programs

Basic Research Long range goal of the cold regions basic research is to expand the scientific base of knowledge on cold regions processes, both natural and man-induced, and to broaden knowledge concerning the fundamental properties of principle cold regions materials — snow, ice, and frozen ground. The knowledge gained can then be utilized in the exploratory and advanced research and development programs of the Laboratory's technical areas.

Overland Transport and Facilities. This program area seeks to provide the necessary knowledge, criteria, standards, and techniques to reduce the cost and increase the effectiveness of overland transport in cold regions, including roads, airfields, railroads, off-road vehicles, and pipelines.

Being examined are expedient roads capable of withstanding intense traffic loads for a limited time for use in military operations or in construction activities; guidelines for controlling frost heave and thaw weakening of permanent roads and heavy-duty airfields; engineering criteria for base courses and foundations for expedient military airfields and for asphalt and concrete pavements that will not exhibit deleterious cracking due to low temperature contraction; engineering criteria for logistic operations with wheeled vehicles through shallow snow, snow covered roads, roads constructed of snow, frozen terrain, and during periods of thaw; criteria for long distance heavy-duty logistical operations with surface-effect vehicles for travel over most types of Arctic terrain.

Water Resources. The goals here are to develop a basic understanding of the influence of low temperatures, and especially the presence of ice, on the physics of rivers, lakes, marginal seas, and man-made water bodies. Knowledge developed will be used to provide the necessary standards, criteria, techniques, and expertise to result in the best possible management of cold regions water resources for transport, power, water supply, and recreation. It seeks to eliminate, to the greatest extent possible, flooding and damage due to ice jams.

Geotechnical Exploration. This area seeks to develop the skills, techniques, and if necessary, the equipment required to obtain information on the properties and characteristics of materials of the earth to establish the geotechnical data base for cold regions research. Techniques to be utilized include: (a) direct sampling, (b) indirect sampling utilizing electromagnetic, seismic, and chemical sensors, (c) satellite technology and remote sensing.

Material Functioning. This area seeks to provide the necessary criteria for the design of materiel and equipment that will not be adversely affected by low temperatures, snow, ice, or frozen or thawing ground.

Control of Snow and Ice. The goals of this area are to reduce the frequency and amount of impedance of transport, construction, and other activities due to adverse effects from accumulations of snow and ice.

Natural Resource Management. The goals of this technological area are to provide the required expertise, standards, and engineering criteria to predict impact of engineering works on the cold regions environment and apply those measures that will both conserve and enhance the quality of natural and man managed environments. Program areas include characterization of the environment and environmental engineering including water supply and treatment, air pollution control, and management of sewage and wastewater. In addition, methods will be developed for the efficient conservation and utilization of energy.

Structures and Construction Techniques. This technical area seeks to establish the standards, techniques, and criteria needed to design, construct, and maintain expedient and permanent habitations, structures and facilities in cold regions that will provide a service and quality of life comparable to that achieved in temperate regions. Primary areas of reference include research on structures and facilities, the study of winter construction techniques, and the excavation and placing of frozen ground.

REPORT

The U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory (USACRREL) is located two miles north of Dartmouth College in Hanover, New Hampshire. The main laboratory building is a three story U-shaped building consisting of two levels above ground and one below. The basement contains combination office-laboratories, photographic laboratories and drafting and illustrating lay out areas, refrigeration equipment and shops. A unique feature of the laboratory is a cluster of twenty four refrigerated laboratory cold rooms equipped with circulating coolant brines at either -37°C or -58°C . The cold rooms vary in size up to 24 by 27 feet and may be controlled to maintain any temperature between -15°C and -50°C . Research laboratories, offices and a library make up the remainder of the first and second floors.

The laboratory is under the jurisdiction of the Chief of Engineers. It is a result of the merger in 1961 of the U.S. Army Snow, Ice and Permafrost Research Establishment of Wilmette, Illinois and the U.S. Army Corps of Engineers Arctic Construction and Frost Effects Laboratory of Waltham, Massachusetts. The establishment of USACRREL is the culmination of the research and engineering programs in geocryology that began in the 1960's. Early programs focused on research, design and testing pertaining to the effects of freezing and thawing on pavements, airfield runways, subgrades and base courses, piling and foundations; field and laboratory investigations were conducted in the general fields of snow, ice and frozen ground. From an original staff of 152 the laboratory has grown to a current total of about 105 scientists and engineers and about 135 administrative and support personnel.

During World War II, attention was focused on the engineering problems associated with the design and construction of airfields, roads and military facilities in Greenland, northern Canada, Alaska and the northern United States. During the post war period techniques for the construction of compacted snow runways for heavy wheeled aircraft were devised and developed. Contributions were made to the location, design and construction of the DEW (Distant Early Warning) line radar stations at sites in Alaska, Canada and Greenland and to the construction of the undersnow Camp Century in Greenland and the undersnow camps built in Antarctica by the U.S. Navy for the National Science Foundation. In recent years research emphasis on problems associated with permafrost and the Alaskan tundra has increased. Particular attention has been devoted to the collection of environmental data in cold regions.

Research pursued during recent years has produced a large store of knowledge

on the properties of snow, ice and frozen ground. The strength and bearing capacities of fresh and salt water ice have been measured under a wide variety of conditions. Methods of removing ice jams from inland rivers have been devised. The visco-elastic properties of snow ice and frozen ground have been determined. Methods of processing snow for the construction of roads and runways and constructing gravel roads over glacier ice have been developed. The physical properties of muskeg have been studied. The mechanisms of frost heaving and the phenomenology of freezing and thawing have been investigated. Criteria for the use of pile and floating foundations on polar snow have been developed. Vibrational pile driving in frozen ground has been accomplished. Methods of excavation and removal of snow, ice and frozen ground have been studied and evaluated. Experimental tunnels in snow, ice and permafrost using a variety of excavation techniques have been constructed. Research on problems associated with drifting snow has been conducted and snow cover surveys in Alaska, Canada and the northern U. S. have been made and periodically updated. Environmental and climatological histories have been reconstructed from the analysis of ice cores recovered from the Greenland and Antarctic ice sheets and from the analysis of tree rings. Studies on heat dissipation from under ice installations and heat transfer in snow, ice and frozen ground have been completed. The electromagnetic properties of snow and ice have been investigated.

The basic chemical, physical and mechanical properties of snow ice and frozen ground have received much attention. Water-ice phase composition as a function of temperature has been measured for representative materials. Ionic diffusion, electrical conduction, deformation and creep measurements have been obtained for many materials. Theoretical work on the thermodynamics of freezing and thawing and rate phenomena in frozen ground was initiated. The propagation and attenuation of acoustic and electromagnetic waves has been investigated. The mechanisms of defect propagation and recrystallization in ice has been studied. Theoretical and experimental studies of ice nucleation and surface and interfacial phenomena of snow, ice and mineral matter in frozen ground have been accomplished. The percolation of water through snow covers, the adhesion of snow and ice to structures, phase relations during fractional crystallization of sea water and the annealing of ice have been studied.

The current research program, as it relates to periglacial research includes investigations in the following topics as they pertain to cold regions: Bioclimatology and ecology, microbiology, geochemistry, hydrology of snow, ice, rivers, reservoirs, lakes and estuaries, terrain analysis and geomorphology, atmospheric chemistry, ice nucleation, fog dispersal, thermal and mass balance of permafrost and snow and ice covers, the physics and chemistry and mechanics of snow, ice and frozen ground, environmental processes and impacts, physical and cultural landscape analysis and land use planning, the effects of oil spills. The interdisciplinary staff of scientists and engineers is participating in the following current interorganizational or international programs: The International Joint Commission on the Great Lakes; The International Commission on the Arctic Ice Dynamics Joint Experiment; Studies pertaining to the Alaskan pipeline; The International Biological Program.

In addition a number of the staff serve on national and international committees and advisory boards concerned with topics pertaining to periglacial phenomena.

USACRREL has endeavored to gather together and organize information on topics relevant to the cold regions mission in a specialized library and information retrieval system. This activity is directed from the Hanover Laboratory but centers on a special staff at the Library of Congress. Since 1950 more than 50,000 technical publications pertaining to cold regions science and engineering have been micro-filmed and accessioned. About 5,000 new documents are added each year. Each month a listing of new documents together with an accompanying microfiche is made available to the staff. Each year USACRREL Report 12, "Bibliography Cold Regions Science and Technology" with computer printed author and subject indexes is updated and distributed to same 500 addresses. Additional copies are made available to interested parties on request. This information system is designed to be compatible with a larger polar information system whenever a project of such dimensions can be defined and implemented.

The USACRREL staff are among the principal contributors to the literature on cold regions science and engineering. The USACRREL publication series has been established and is maintained to effectively communicate to a large number of diverse and interested parties the research results and engineering solutions to cold regions problems generated by the laboratory. To date, USACRREL together with its predecessor organizations have published in excess of 2,500 technical reports, manuals, state-of-the-art reviews, translations and journal articles. All of these publications are made available to the scientific community as they appear. The reports currently are being distributed routinely to about 500 addresses and an additional 350, on the average are distributed in response to specific inquiries each month. A list of all USACRREL Technical publications is contained in Special Report 175 and its supplement issued in April 1973.

B. LADANYI
Director

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE*
CENTRE D'INGÉNIERIE NORDIQUE

1. *Nom du laboratoire:* Centre d'Ingénierie Nordique de l'Ecole Polytechnique de Montréal (CINEP).

Adresse: Ecole Polytechnique,
C.P. 6079, Succursale "A".
Montréal, Québec H3C 3A7, Canada.
Année de création: 1970

2. *But ou Intitulé général des recherches*

En général, le Centre s'occupe de résoudre les problèmes d'ingénierie soulevés par le développement des régions nordiques. A présent, les recherches au sein du Centre peuvent être classées en cinq programmes suivants, chacun comportant de 2 à 5 projets de recherche particuliers:

- (1) Géotechnique nordique;
- (2) Matériaux et éléments de construction nordique;
- (3) Ecologie des agglomérations nordiques;
- (4) Comportement nordique des matériaux et des machines;
- (5) Exploration et exploitation minière en milieu nordique.

3. *Administration*

- Nom du Directeur actuel: Branko LADANYI
(titres) Directeur de Centre d'Ingénierie Nordique, Professeur titulaire à l'Ecole Polytechnique.
- Organisation administrative: Le CINEP est un centre de recherche de l'Ecole Polytechnique de Montréal. Il est administré par le Directeur, le Secrétaire, le Conseil de direction et l'Assemblée des membres.

4. *Personnel*

Nombre de Chercheurs impliqués dans les projets: 21
Nombre d'Ingénieurs: 1
Nombre de Techniciens, Administratifs et Ouvriers de service: 7

5. *Matériel*

— Budget (1974)	
Fonctionnement annuel (non compris les salaires)	\$ 75,000
Salaires annuels	75,000
	\$ 150,000

- Principales installations et gros appareils:
Voir la liste annexée (Ressources physiques).

* Affiliée à l'Université de Montréal, Québec, Canada.

6. Orientation actuelle des recherches

Vu que le domaine d'intérêt principal du Comité de Coordination sont les recherches péri-glaciaires, on se limitera ici à mentionner seulement les projets de recherche au sein du programme de la géotechnique nordique. Ces projets traitent les sujets suivants:

- (1) Investigation sur place des propriétés géotechniques des sols nordiques, (pergélisol et muskeg);
- (2) Capacité portante des sols gelés;
- (3) Mesure en laboratoire des propriétés rhéologiques des sols gelés (L'effet de la densité et de la teneur en glace);
- (4) Pressions dues au gel sur une paroi moulée.

7. Publications propres au laboratoire

Jusqu'à présent le Centre n'a pas eu sa propre série de publications. Toutefois, des tirés-à-part des publications dont la liste est donnée en rapport, sont disponibles sur demande.

Annexe

Centre d'Ingénierie Nordique

Ressources physiques

Tel qu'indiqué spécifiquement dans chacun des projets de recherche décrits dans le CREP 111, le CINEP jouit des ressources physiques suivantes de l'Ecole Polytechnique, qui sont spécifiquement requises pour la réalisation des travaux envisagés:

- tracteur-chenille de type Bombardier, complètement équipé pour les travaux en terrain nordique (muskeg compris), et muni d'une foreuse Mobil;
- pressiomètre Ménard, avec accessoires;
- pénétromètres Fugro de 1,5 et 10 tonnes;
- pénétromètre dynamique SPT;
- porosimètres;
- extensomètre optique;
- instruments d'analyse des photographies aériennes;
- équipement de mesure de la température du sol *in situ*;
- vérins et dynamomètres de haute capacité;
- chambre froide de 18' x 19' x 9', de +40°F. à -40°F;
- machine de traction-compression pour toute gamme de température, d'une capacité de 5,000 kgf;
- dilatomètre pour l'analyse des changements de phase;
- unités de diffraction-X pour la mesure exacte des structures cristallines de ces phases;
- autoclave et étuve;
- machine de traction et de fatigue avec contrôles asservis (MTS), d'une capacité de 200,000 livres;
- bancs d'essais expérimentaux de la lubrification hydrostatiques au moyen de liquides et de gaz;
- bancs d'essais pour l'étude de moteurs et de compresseurs;
- banc d'essais d'impacts;
- banc d'essais d'engrenages;
- laboratoire complet de mécanique des sols;
- laboratoire complet de mécanique des roches;
- laboratoire de génie sanitaire bien équipé;
- laboratoire d'hydrodynamique;
- laboratoire de béton et de structures;
- laboratoire de géochimie analytique;

- laboratoire de morphométrie électronique;
- laboratoire de géophysique appliquée.

GENERAL

The Centre d'Ingénierie Nordique was formed in May 1970 at Ecole Polytechnique of Montréal to satisfy an increasing interest among the students and several members of the teaching staff in the development of instruction and research in northern engineering, especially in relation with the development of natural resources in the Canadian North.

The main task of the Centre is to encourage multidisciplinary efforts in all aspects of northern engineering research within the school and to enable a better cooperation with other bodies with similar interest.

While activities in several engineering fields are anticipated in a near future, the research done up to 1974 within the Centre has been almost exclusively in the field of frozen ground mechanics.

Although some basic laboratory equipment, as well as a cold room for testing frozen soils, is available to the Centre, the research has until now been mostly concentrated to field and theoretical studies related with the *in-situ* determination of creep properties of frozen soils and the behavior of piles and anchors embedded in permafrost. An outline of the principal research projects and the list of connected publications is given in the following.

SUMMARY OF RESEARCH PROJECTS 1970–1972

PROJECT 1. DEVELOPMENT OF AN ENGINEERING THEORY OF CREEP OF FROZEN SOILS

A unified engineering theory of time, temperature and normal pressure dependent deformation and strength of frozen soils has been developed and compared with the existing theories and the available experimental information.

In developing the theory, basic concepts and methods used in creep theories for metals have been followed. This enabled the creep and creep failure information to be expressed in a relatively simple analytical form using a minimum number of experimental parameters. Due to its simple and systematically normalized form, it is hoped that the theory will find useful application as a framework for generalizing experimental information as well as a basis for solving various frozen soil mechanics problems.

Finally, it is found that, in spite of the apparent abundance of published experimental data on frozen soil behavior, a clear answer to a number of questions is still lacking. In particular, it is felt that the effect of mean normal pressure on creep and creep failure of frozen soils requires a systematic and thorough investigation.

PROJECT 2. EVALUATION OF IN-SITU CREEP PROPERTIES
OF FROZEN SOILS WITH THE PRESSUREMETER

(Joint project with the Geotechnical Section
of the Division of Building Research,
National Research Council of Canada)

A series of field tests were carried out at a permafrost site near Thompson, Manitoba, with the purpose of investigating the suitability of the Ménard Pressuremeter as a tool for *in-situ* determination of the rheological properties of frozen soils.

The field tests, which included both short-term and long-term tests, were carried out with the standard pressuremeter equipment with only some minor modifications. A special care was taken in drilling and preparing the borehole for the tests in order to minimize the temperature disturbance.

By using a newly developed method, it was possible to obtain from the tests both the short-term and the long-term strength parameters. The first were obtained from pressuremeter tests of conventional type, while the latter resulted from stage-loaded creep tests. In addition to the time dependent strength, the pressuremeter creep tests enabled also establishing the constitutive creep equation of the frozen soil.

PROJECT 3. STUDY OF SOME METHODS FOR IN-SITU TESTING
OF MECHANICAL PROPERTIES OF FROZEN SOILS

The research project was made possible by a two-year grant of \$ 80,000, received from the Quebec Department of Education. The purpose of the grant was not only to promote the research but also to encourage the formation of specialists in this particular field in which an increasing staff shortage has been felt in recent years.

The field work for this project was carried out during the summer of 1972 by a team composed of a professor, three students and a technician. The team was equipped with a specially designed off-road vehicle enabling a number of *in-situ* soil testing methods to be tried out.

The tests were performed in a frozen peat bog near Schefferville, Quebec. The types of tests included in the study were the short and long term pressuremeter tests, the standard penetration test with three types of penetrators, and a load-controlled static penetration test. A comparison of test results obtained in this study shows that a proper combination of several such field tests may represent an economical method for obtaining field data necessary for the design of foundations embedded in frozen soils.

PROJECT 4. FIELD TESTS OF GROUTED ROD ANCHORS IN PERMAFROST

(Joint with the Geotechnical Section, Division of Building Research,
National Research Council of Canada)

The field study of grouted pile anchors in permafrost undertaken at two sites in northern Manitoba was designed to investigate the time-dependent behavior of anchors subjected to uplift loads less than those causing rapid failure. The testing

program, which consisted of applying constant or step-wise increasing loads for time periods ranging from one hour to more than a year, enabled all three typical stages of creep displacement to be observed, that is, primary, secondary, and tertiary.

From observations of the piles *in situ* after failure as well as from analysis of the test results it was evident that after a certain amount of creep displacement the piles failed by slip along the soil-pile interface. Slip failure, which was considered to coincide with the onset of tertiary creep, occurred at very different times under different loads, but the total displacement associated with it was of the same order of magnitude for all the tests.

A theoretical analysis of the test results, based on engineering creep theory, shows how the time-dependent behavior of anchor piles can be related to the basic creep parameters of frozen soil. In addition, it is shown how field creep data may be used for estimating long-term adfreeze strength of frozen soil for the design of anchor piles. The design adfreeze strength is based on a limiting value for the total creep displacement of the anchor pile during its lifetime. The estimated long-term adfreeze strengths computed for the tests described compare well with values obtained by other investigators.

PROJECT 5. DESIGN OF Laterally Loaded Piles in Permafrost

(Joint with the Mackenzie Valley Pipe Line Research Limited)

In connection with the design of a pile-supported above-ground pipeline a field program was conducted at a permafrost site near Inuvik, N. W. T. to determine the load-creep characteristics of laterally-loaded timber and steel piles embedded in permafrost.

Empirical design capacities were derived from the load-test results. In addition, two methods were proposed for estimating the behavior of laterally loaded piles in permafrost. The first one, based on the theory of lateral subgrade reaction, enabled to estimate from lateral pile load tests, the value and the variation with time and applied load of the secant modulus of subgrade reaction. The second method, based on a creep hardness theory, enabled to predict the time and temperature dependent pressure deflection curve for the frozen soil under a lateral pile load, from the basic constitutive creep equation of the soil as determined, e.g., by a pressuremeter creep test. Comparison of predicted and observed pile behavior has shown promising results.

CENTRE D'INGÉNIERIE NORDIQUE

Publications en Ingénierie Nordique 1970/72

LADANYI, B., 1970 — Permafrost — défi aux constructeurs dans le Nord. *L'Ingénieur*, vol. 56, mai 1970, Montréal; p. 19–22.

LADANYI, B., 1972 — An engineering theory of creep of frozen soils. *Canad. Geotech. Jour.*, vol. 9; p. 63–80.

JOHNSTON, G. H. & LADANYI, B., 1972 — Field tests of grouted rod anchors in permafrost. *Canad. Geotech. Jour.*, vol. 9; p. 176–194.

LADANYI, B., 1972 — In-situ determination of undrained stress-strain behavior of sensitive clays with the pressuremeter. *Canad. Geotech. Jour.*, vol. 9, p. 313–319.

Publications en Ingénierie Nordique 1973/74

LADANYI, B., 1973 — Bearing capacity of deep footings in sensitive clays. *Proc. 8th Int. Conf. on Soil Mech. & Found. Engrg, Moscow*, vol. 2.1; p. 159–166.

LADANYI, B. & JOHNSTON, G. H., 1973 — Evaluation of in-situ creep properties of frozen soils with the pressuremeter. *Proc. 2nd Int. Conf. on Permafrost, Yakutsk, North Amer. Contr.*; p. 310–318.

ROWLEY, R. K., WATSON, G. H. & LADANYI, B., 1973 — Vertical and lateral pile load tests in permafrost. *Proc. 2nd Int. Conf. on Permafrost, Yakutsk, North Amer. Contr.*; p. 712–721.

LADANYI, B., 1974 — Site determination of the properties of the frozen soil. *Proc. Conf. on Building in Northern Communities, Arctic Inst. of North America, Montreal*; p. 30–40.

LADANYI, B. & JOHNSTON, G. H., 1974 — Behavior of circular footings and plate anchors embedded in permafrost. *Canad. Geotech. Jour.*, vol. 11; p. 531–553.

JOHNSTON, G. H. & LADANYI, B., 1974 — Field tests on deep power installed screw anchors in permafrost. *Canad. Geotech. Jour.*, vol. 11; p. 348–358.

ROWLEY, R. K. & WATSON, G. H. & LADANYI, B., 1973 — Prediction of pile performance in permafrost under lateral load. *26th Canad. Geotech. Conf., Toronto*, 1973.

HODE KEYSER, J., 1973 — De-icing chemicals and Abrasives, State of the Art. HRR-425, *Transportation Research Board*, Washington; p. 36–51.

BETTIGNIES, C., 1973 — Wind energy — Its utilisation in isolated & arctic regions. *The Northern Engineer*, vol. 5, No. 4; p. 13–17.

RAYMOND N. YONG

Director

MCGILL UNIVERSITY SOIL MECHANICS RESEARCH LABORATORY

The Soil Mechanics Research Laboratory conducts integrated, multidisciplinary research studies on a wide variety of geotechnical problems. The eight fulltime staff members have backgrounds in soil mechanics, geology, mathematics and computer methods, soil science, and physical chemistry. The physical facilities are divided between the Soil Physics Laboratory (containing X-ray diffraction equipment, scanning electron microscope, mass transport analyser, gas chromatograph, low and high temperature DTA units, high vacuum adsorption apparatus, soil suction equipment and all associated equipment for complete chemical and mineralogical identification of soils, and the Soil Mechanics Laboratory containing, in addition to conventional equipment, true triaxial equipment, computer controlled triaxial unit, vehicle mobility test track with flash X-ray camera for full scale studies, walk-in cold rooms for frozen soil studies, resonant column and shock tube for dynamic studies.

SUMMARY OF RESEARCH PROJECTS

SOME CONSIDERATIONS IN THE FROST HEAVE OF SOILS

A continuing study is being conducted, where the operating mechanism of *in situ* frost heave is identified in order to control it effectively by physico-chemical means such as the addition of salts. Investigations into the causes for the reduction in frost-heave with the addition of salts have been carried out.

SALT LEACHING IN SOILS, PHASE BOUNDARY TRANSPORT AND FROST ALLEVIATION PROBLEMS

Realizing that the effectiveness of the salt treatment is a function of the amounts of salts present in the soil, laboratory experiments along with compatible theories will be generated to predict the salt profile with time and rainfall conditions with special consideration given to the internal forces of interaction in the soil water system, and effects of cyclic freezing and thawing.

COMPACTION CHARACTERISTICS OF PARTIALLY FROZEN SOILS

Studies of the compaction characteristics of partially frozen soils are being carried out, with particular emphasis on the assessment of the inter-relationships between compaction effort, molding water content, chemical additives, ambient (freezing) temperature, soil type and soil structure.

INTER-RELATIONSHIPS BETWEEN HEAVING PRESSURES
AND FROST SUSCEPTIBILITY

The continuing study of heaving pressures of frozen soils has reached the stage of application to field problems. In particular, investigations are being conducted to correlate heaving pressures and frost susceptibility of soils in the field with developed theories.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS
OF MULTI-DIMENSIONAL CONSOLIDATION

This project attempts to correlate theoretical predictions from available three-dimensional theories with deformation patterns and pore pressures measured experimentally in multi-dimensional consolidation problems.

REMOTE SENSING FOR GROUND MAPPING OF ARCTIC AREAS

Indirect means of terrain mapping using aerial infra-red techniques is being undertaken. Control check is established through physical ground survey.

RESPONSE OF SENSITIVE CLAYS TO DYNAMIC LOADING

The stress-strain-strength properties of sensitive clays from the Champlain Sea deposits of Quebec and Ontario are being investigated under conditions of transient and oscillatory loading systems in relation to stability of natural slopes. Variable parameters under study include frequency, amplitude, number of load applications. A field study to determine *in situ* response to dynamic loading has been conducted to allow comparison of laboratory and field soil performance.

MOBILITY RESEARCH PROGRAM

The current studies involved the field performance of off-road vehicles. Developing portable apparatus for evaluating soil or snow trafficability. Studying the effect of geometrical parameters and snow or soil parameters on the performance of grousers and cutting blades. Study of the effect of wheel parameters and track parameters on the vehicle performance. Developing mathematical models for performance prediction of off-road wheel or tracks.

SOIL-WATER INTERACTION, FABRIC AND SOIL BEHAVIOUR

The relationship between fundamental particle interactions and the macroscopic soil behaviour is studied to determine mechanisms of deformation and shear resistance. The mineralogical and geological controls on resulting soil fabric are studied by comparing natural soil structures with structures resulting deposition from suspensions under laboratory conditions. Natural soil samples are leached to selectively remove components which contribute to shear performance. Standard tests are used to determine mechanical behaviour after leaching.

SOIL-ORGANIC INTERACTION

The interaction between organic materials (including crude oil) and soil is being studied to determine the mechanisms of retention and the effect of subsequent weathering on the mobility of the organic phase. Soil stabilization by organic additives is also studied.

TSUTOMU TAKASHI
Managing Director

SEIKEN REIKI CO., LTD., JAPAN*

GENERAL

The purpose of our laboratory, which was started at the same time to the birth of the artificial freezing in Japan, is to study the subjects concerned with process of freezing and frozen soil, and this review will outline the results of the past studies and the present activities in this laboratory.

Frozen soil, especially which is produced artificially and is well maintained, has played an important role as one of civil engineering materials in Japan as well as some other countries, since artificial ground-freezing was applied for the first time to an actual construction work with success in 1962. In the application of this method, however, freezing of ground is necessarily accompanied with frost action such as heaving or an increase in earth pressure, which is often the largest trouble in actual case. Recently, the frost action caused by a large capacity of below-ground tank for liquefied cryogenic gas is becoming a serious problem. In other word, it shows a new tendency that frost action problem has newly arisen in the place where natural ground-freezing was never seen formerly. The situation above mentioned has provided a new field and stimulated the research on frozen ground problems from a different point of view.

SUMMARY OF RESEARCH PROJECTS 1960—1969

Theoretical and experimental studies were done in various directions in order to develop and establish the technological system of artificial ground-freezing, because the system involved not a few difficulties to be solved.

In the first place, the two-dimensional freezing problem around a single freezer pipe in the infinite ground was solved theoretically under the condition of unsteady state, and this enabled us to calculate the temperature distribution, the freezing rate and the amount of heat gain during freezing (*Ref. 1—D*). On the basis of the calculation, field experiments were carried out, the results of which not only proved the theory to be accurate enough for practical usage, but brought us the founda-

* Autocentre Building, 3 Kawaraya, Minami, Osaka, Japan.

mental information on thermal soil mechanics required to design of ground-freezing (Ref. 1—II, III).

As to underground seepage stream, which often obstructed freezing, the critical condition for joining of each frozen zone into an ice wall was theoretically obtained (Ref. 2), and this made us possible to prepare effective countermeasures. The thawing rate of frozen soil was also calculated (Ref. 1—IV).

In order to estimate heaving amount and its pressure, two sets of experimental apparatus of open system were equipped, and a lot of freeze tests was started in this laboratory. These tests enabled us to predict the frost behavior of the ground to some extent before freezing was put into practice.

On the other hand, the progress of freezing around below-ground storage for liquefied cryogenic gas was analyzed theoretically; the temperature distribution, freezing rate and amount of heat removed were solved about a model tank assuming firstly to be a spherical one with a insulation layer inside (Ref. 3) and nextly a hemispherical one with thermal resistance on its surface considering heat through ground surface (Ref. 4). And moreover, applying this results, it was enabled us to determine the stress and displacement arising in the ground around progressive frozen zone (Ref. 5).

Though the subjects of artificial freezing of soil were overcome on the practical or theoretical base, frost action troubles have remained unsolved as the most significant problem.

RECENT AND PRESENT STUDIES (1970—)

Two types of researches have carried out and are still continuing; one is the experimental work on frost behaviors of soil as before, and the other is related to below-ground storage.

About the former, we intend to make clear the influence of the principal factors to frost heave and its pressure, for instance, load pressure, pore-water pressure, cooling temperature, penetration rate of freezing line, temperature gradient and physical and chemical properties of soil. One of the apparatus used in the experiment is shown in Fig. 1, and freeze test is carried out in open system under constant load pressure. The cooling devices equipped on both sides of soil sample are kept at the same temperature above 0°C , before the temperature on the upper side of sample is reduced below 0°C in order to start the test.

The results obtained so far in the experiment may be summarized as follows:

(1) When the load pressure is below a certain limit the soil sucks up water, and contrarily the soil discharges water during freezing when the load is above the limit.

(2) The amount of heave is depressed hyperbolically or exponentially in accordance with increase of the load, but complete elimination of it may be difficult due to the presence of unfrozen water.

(3) When the pore water pressure exists in the soil, the amount of heave depends on the effective pressure between soil particles regardless of the pore water pressure.

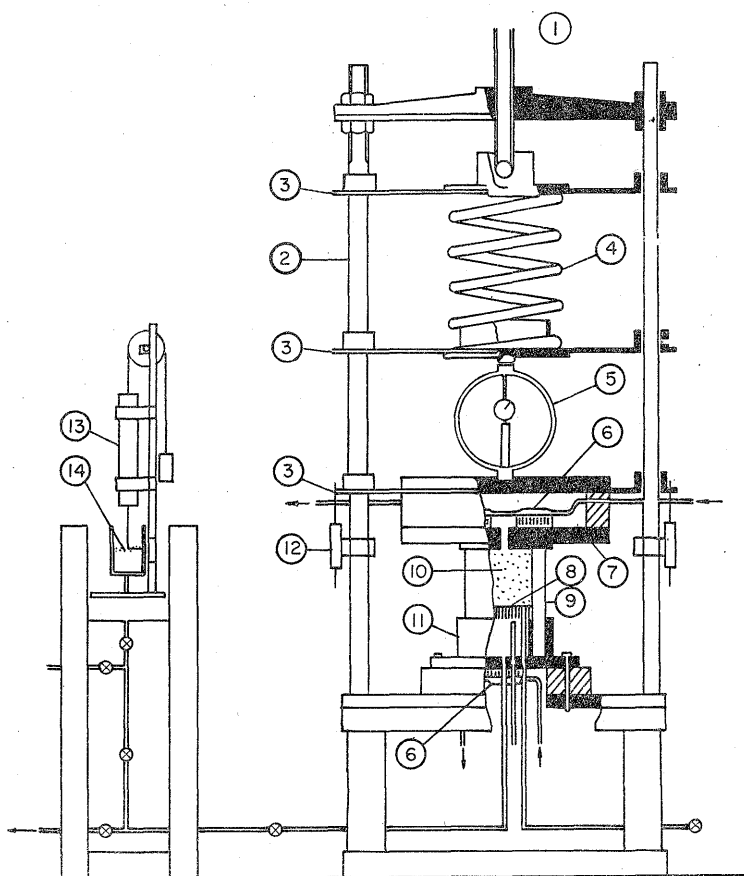


Fig. 1.

1. load-adjusting screw; 2. pole; 3. guide plate; 4. spring coil; 5. proving ring; 6. thermo-electric module; 7. cooling plate; 8. porous plate; 9. plastic cylinder; 10. soil sample; 11. end cup; 12. potentiometer; 13. diff. transformer; 14. float

The results described above were obtained under the condition of the changing penetration rate with time as shown Neumann's solution. For the next step, in order to investigate the relation between heave amount and penetration rate, we have developed the method to make the rate constant approximately during the experiment. The constant penetration rate is obtained by controlling the cooling temperature along the calculated value. This experiment is now proceeding.

Another experiment is simultaneously proceeding in order to observe heaving pressure under the condition of restrained displacement.

On the research for below-ground tank, the solution of temperature distribution around a model shaped ellipsoid of rotation was obtained and is now in the middle of the calculation. And its field test was carried out for three months with a model of below-ground tank 70 m³ in capacity filled with liquefied nitrogen gas, and the data obtained are now analyzing in detail.

Publications

- (1) TAKASHI, T., 1961—65 — On artificial Ground-Freezing (I—V). *Refrigeration. Jour. Japanese Association of Refrigeration*: vol. 36, p. 889—903, p. 1082—1101; vol. 37, p. 1—5; vol. 39, p. 398—409; vol. 40, p. 840—846 (in Japanese, partly with English summary).
- (2) TAKASHI, T., 1969 — Influence of Seepage Stream on the Joining of Frozen Soil Zones in Artificial Soil Freezing. *Highway Research Board, Special Report*, 103; p. 273—286 (in English).
- (3) TAKASHI, T., and SUMIYOSHI, M., 1969 — Progression of Freezing Front around Belowground Storage of Liquefied Cryogenic Gas. *Refrigeration*, vol. 44; p. 910—922 (in Japanese with English summary).
- (4) TAKASHI, T., 1972 — On the Progression of Freezing Front around Belowground Storage of Liquefied Cryogenic Gas (II). *Refrigeration*, vol. 47; p. 521—537 (in Japanese with English summary).
- (5) TAKASHI, T., 1972 — On the Stress and Displacement in Unfrozen Soil Zone around Artificial Frozen Soil. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 200; p. 49—62 (in Japanese).
- (6) TAKASHI, T., and MASUDA, M., 1972 — An Experimental Study of the Effect of Loads on Frost Heaving and Soil Moisture Migration. *Jour. Japanese Soc. of Snow and Ice*, vol. 33; p. 109—119 (in Japanese with English summary).