

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 x 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 (bascullement 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'ÉQUIPEMENT 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 × 80 × 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 m × 2 m × 2 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°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 (strainages). 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.