

## LES ETUDES DE CRYOCLASTIE AU CENTRE DE GEOMORPHOLOGIE DU CNRS A CAEN

par ANDRÉ JOURNAUX<sup>\*</sup> et JEAN-PIERRE LAUTRIDOU<sup>\*\*</sup>, Caen

Construit en 1964 par le Centre National de la Recherche Scientifique, le Centre de Géomorphologie a été en partie conçu pour l'étude des processus de désagrégation mécanique et de décomposition chimique des roches sous les différents climats, reconstituées en milieu artificiel et contrôlé. Les calcaires offraient un matériau de choix, tant par les multiples faciès représentés en Normandie et en général en France, que par les problèmes posés par leur aptitude à la gélifraction et à la solubilité, et par la variété des produits fournis. Les processus mis en cause, leur efficacité, leur rapidité, ne pouvaient être appréhendés que par une étude minutieuse en laboratoire et en chambres froides. Aussi, les programmes de cryoclastie et de formation de croûtes calcaires ont-ils été parmi les premiers retenus et mis en route. Si la formation des croûtes calcaires en tubes expérimentaux vient d'être réalisée<sup>1</sup>, les résultats des recherches de gélifraction expérimentale ou «microgélivation» au sens ethymologique du mot), ont déjà fait l'objet de multiples publications<sup>2</sup>; enfin nous consacrerons à la fin de cet article un paragraphe concernant les recherches sur le terrain et les études de «macrogélivation».

En Géomorphologie, il y a, semble-t-il, deux façons d'aborder le problème de l'expérimentation:

1<sup>o</sup>) Soit en cherchant à recréer un phénomène observé dans la nature, mais dont la rapidité d'évolution est inconnue. On doit alors reconstituer la totalité des facteurs mis en cause, et, pour cela, connaître ceux-ci avec la plus grande précision. Ce n'est donc pas le résultat qui compte, puisqu'on peut l'observer plus commodément dans la nature, mais vérifier le comportement d'un matériel par des mesures et des observations continues: par exemple la migration de l'eau dans les roches, ou la rapidité de la gélifraction de certains calcaires pris en un site donné;

<sup>\*</sup> Professeur à l'Université de Caen, Directeur du Centre de Géomorphologie, Président du Comité National Français de Géographie.

<sup>\*\*</sup> Chargé de Recherches au Centre de Géomorphologie, responsable du Laboratoire de Cryoclastie.

<sup>1</sup> Les résultats acquis par J. L. DUMONT, Ingénieur Chimiste au Centre de Géomorphologie seront publiés dans le Bulletin du Centre N° 21.

<sup>2</sup> Notamment sous les signatures de J. P. LAUTRIDOU et autres dans les Bulletins N° 5, 6, 9, 10, 13, 14, 15, 19 (et 21 à paraître).

2<sup>o</sup>) soit en isolant un paramètre parmi d'autres, et, dans ce cas, cerner le processus déterminant: par exemple définir le rôle de la porosité dans la gélifraction.

Par ces quelques exemples, on voit quelles sont les difficultés à résoudre avant d'entreprendre une série d'expériences: soit que les données exactes du milieu à reconstituer manquent, soit que la durée trop longue de l'expérience limite considérablement l'intérêt de l'entreprise.

### L'équipement:

A Caen, l'équipement se compose surtout de deux chambres froides de 30 m<sup>3</sup> et de 20 m<sup>3</sup> et plusieurs enceintes thermiques susceptibles de recevoir 2000 échantillons de 1 à 2 kg chacun, portés par lots de 100 sur des chariots (chaque série expérimentale compte en principe 10 échantillons semblables, ce qui permet d'éliminer les causes accidentelles faussant les résultats, qui s'appuient donc toujours sur 7 ou 8 cas identiques et homogènes (Photo 1).

Avant l'expérimentation, on prépare les échantillons de la façon suivante.

### La préparation des échantillons:

Des blocs de 1,5 kg environ (9 × 9 × 9 cm) sont sciés, puis séchés 48 heures au séchoir à + 50°C.

— Définition de la courbe d'ascension capillaire pendant 48 heures avec alimentation en eau à la base des blocs.

— Après nouveau séchage: on effectue l'immersion progressive des blocs dans l'eau pendant 48 heures. Après détermination du volume par la poussée d'Archimède, on calcule la teneur en eau: quantité d'eau (volume du bloc.

— Après nouveau séchage, on pratique une immersion dans l'eau sous vide pendant 24 heures (vide de 20 à 30 mm avec trompe à eau). Ensuite, le bloc est passé au banc de pression pour terminer sa saturation totale sous pression de 150 bars. Nouvelle pesée du bloc: ceci nous donne la quantité d'eau qui, rapportée au volume du bloc, permet de définir sa porosité totale (en supposant que la saturation en eau soit proche de 100%). Le rapport: quantité d'eau introduite après simple immersion dans l'eau à la quantité d'eau obtenue par pression, nous donne le coefficient de saturation, ou coefficient H d'HIRSHWALD, d'un bloc après une simple immersion (la définition détaillée de nos méthodes sera donnée dans le prochain Bulletin du Centre (N. 21).

— Sur carottes, on détermine la taille des pores au porosimètre à mercure et la perméabilité à l'eau (perméamètre).

— La résistance à la compression de quelques blocs est testée. Nous envisageons maintenant le passage aux ultrasons afin d'éliminer les échantillons fissurés, les essais de gel sur calcaire visant à définir le comportement de roches à porosité intergranulaire et non pas à porosité de fissures, comme la plupart des schistes, des grès et des roches métamorphiques.

### Les protocoles de gel:

Les blocs, après saturation par simple immersion ou au banc de pression, sont posés dans des bacs avec une lame d'eau à la base (1 ou 2 cm de haut)

afin de recharger le caillou qui s'appauvrit en eau durant l'expérience par divers processus (évaporation, «extrusion» d'eau et de glace).

Les poids de débris sont déterminés tous les 10 ou 20 cycles. Les granulométries sont suivies à 20, 50, 100, 200, 300 cycles; la granulométrie de la fraction fine est effectuée à la fin de l'expérience, en général 300 cycles pour les calcaires, 500 cycles pour les roches fissurées.

Afin d'éviter le dessèchement du noyau non éclaté, ou simplement une modification de son bilan en eau au cours d'expériences, on veille (pour les roches poreuses) à ce qu'il n'y ait jamais d'interruption des cycles, ni pendant les opérations diverses (poids de débris, granulométries), ni pendant les périodes de vacances (automatisation des chambres froides). L'emplacement des bacs dans les chariots reste fixe; de plus, la place des chariots dans les chambres froides est la même pendant toute l'expérience.

### Les températures:

La première chambre froide ménage un gel jusqu'à  $-8^{\circ}\text{C}$  et la seconde jusqu'à  $-25^{\circ}\text{C}$ . Le cycle est d'une journée (12 heures/12 heures) dans le premier cas, de 48 heures (24 heures de gel, 24 heures de dégel) dans le second cas. Le dégel s'effectue totalement en chambre froide dans une atmosphère saturée à 85% (figure 1).



Fig. 1. Variations et températures dans les deux chambre froides pendant les expériences  
 1 = température de l'air  
 2 = température à cœur d'un bloc de pierre de Caen de 1,5 kg (porosité = 20%)

Sl. 1. Varijacije i temperature u dva hladnjaka za vrijeme eksperimenta

1 = temperatura zraka

2 = temperatura u središtu stjenovitog bloka iz okolice Caen-a od 1,5 kg (poroznost = 20%)

Enfin récemment, on a obtenu au microscope électronique à balayage une visualisation parfaite des vides.

Nous avons choisi deux directions de recherche: la première consiste à proposer des solutions aux problèmes géomorphologiques (échelle de résistance des roches et interprétation des dépôts périglaciaires comme les grèzes litées); la deuxième essaie d'expliquer les mécanismes du gel.

### Les résultats:

1) **Echelle de résistance: La texture et la microstructure** de la roche interviennent dans la cryoclastie, et on a essayé d'établir «une échelle de gélivité» des roches et un classement des gélifractions (Photo 2). En effet, on remarque que dans la nature certains calcaires résistent mal (calcaires poolitiques, lumachelles ou calcaires coquilliers). En outre, la taille limite des débris est variable: la craie donne des granules de 1/2 mm et des poudres; la craie marneuse, des morceaux de 1 à 5 cm et des granules; les calcaires compacts finement diaclasés, des petits parallélépipèdes se débitant en plaquettes; les calcaires massifs, de grandes dalles. On mesure les débris inférieurs à 25 mm: rapportés au temps, on en déduit la **vitesse d'amenuisement** (dite vitesse de «comminution»); la proportion des fines de 2 à 100 microns détermine la **broyabilité** des roches.

Nous avons pu établir une échelle de gélivité expérimentale (fig. 2) en fonction de critères comme la résistance mécanique et surtout la porosité (chiffre de porosité et taille des pores). Ainsi nous avons distingué les **craies** très gélives, poreuses et à pores entre 0,5 et 2 microns, les **calcaires crayeux** un peu moins gélifs, moins poreux et à pores un peu plus fins (0,2—0,5 microns), les **calcaires lithographiques** de moins en moins gélifs au fur et à mesure que leur porosité est plus faible et que la taille des pores s'amenuise, en particulier les blocs ayant des pores inférieurs à 0,1 micron devenant peu ou pas gélifs en raison de leur incapacité à se saturer correctement en eau. A ces trois types de gélivité I, II, III, il faut ajouter le type IV correspondant aux calcaires perméables peu gélifs bien que très poreux, mais dont les pores assez gros (plus de 2 microns) permettent l'expulsion de l'eau en excédent lors de la prise en gel et provoquent ainsi l'immunisation de la roche. Les photographies au microscope électronique permettent de comprendre la porosité des calcaires et confirment bien les résultats obtenus au porosimètre à mercure pour la taille des pores. Ainsi chaque type de calcaire réagit différemment au gel, suivant un certain nombre de caractéristiques.

— La porosité totale et la courbe de répartition des pores;

— l'ascension capillaire et le coefficient de saturation des pores (coefficient H) découlant de la porosité; de même la perméabilité.

— La résistance à l'écrasement dépend de la qualité, de la quantité et de la répartition du ciment intergranulaire (visibles sur les photographies au microscope électronique). Ainsi la craie (Photo 3) se révèle être un empilement de cristaux de calcite et de coccolithes, dont la taille varie entre 1 et 10 microns et qui ne sont pas reliés entre eux par un ciment; il n'y a donc pas de réseaux organisés de pores, mais des vides intergranulaires, dont le calibre dépend de celui des cristaux. Les pressions pendant le gel s'exercent au niveau de chaque grain, d'où l'élaboration de débris de toutes tailles, du début à la fin de l'expérience. Par contre, le calcaire lithographique peu poreux (Photo

Fig. 2. Types de gélivité en chambre froide, avec alimentation en eau des blocs par la base.

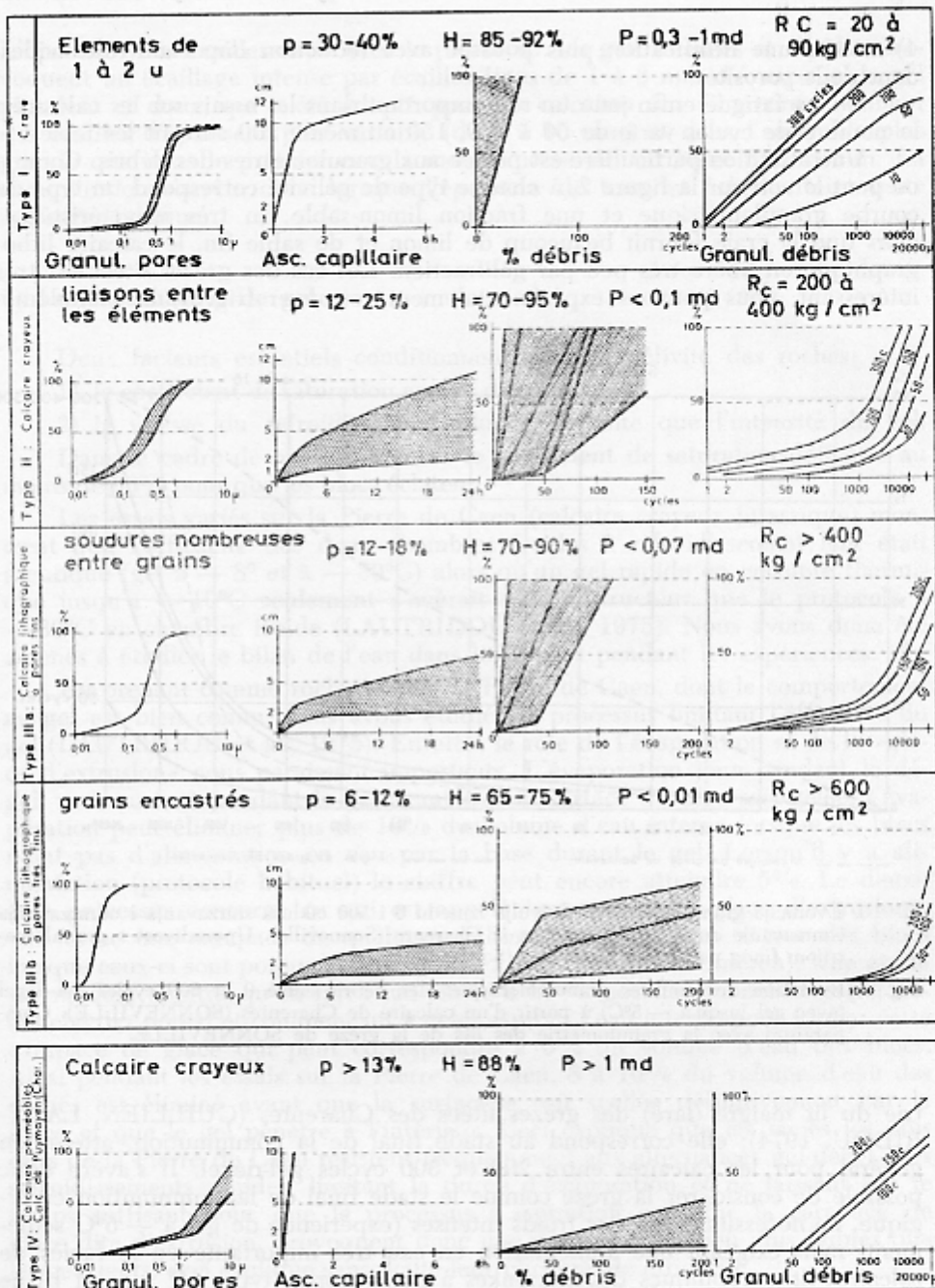
p = porosité totale

H = coefficient H de saturation en eau des pores après 48 h d'immersion

P = perméabilité à l'eau, en millidarcy

Re = résistant à la compression



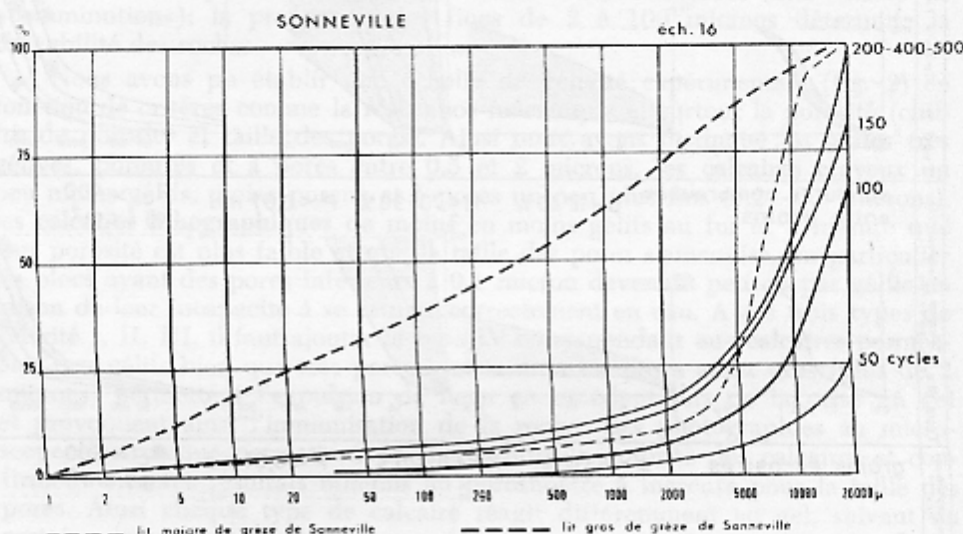


- Sl. 2. Tipovi smrzavanja u hladnjaku sa dodavanjem vode
- $p$  = totalni porozitet
  - $H$  = koeficijent  $H$  vodene saturacije pora nakon 48 h uronjenosti
  - $P$  = propust za vodu u milidarcima
  - $R_c$  = otpor kompresiji

4) montre une lithification plus poussée avec réduction importante des vides, donc de la porosité.

— La fatigue enfin joue un rôle important dans les essais sur les calcaires: le nombre de cycles varie de 50 à 100, 150 ou même 200 suivant les faciès.

Une attention particulière est portée aux granulométries des débris. Comme on peut le voir sur la figure 2, à chaque type de géolité correspond un type de courbe granulométrique et une fraction limon-sable fin très caractéristique: alors que la craie fournit beaucoup de limon et de sable fin, le calcaire lithographique en libère très peu par gélifraction. Les cas des grès lités est très intéressant: nous pouvons expérimentalement retrouver (fig. 3) la granulomé-



Sl. 3. Evolucija granulometrijskih krivulja između 0 i 500 ciklusa smrzavanja i odmrzavanja (smrzavanje do  $-5^{\circ}\text{C}$ ) vapnenca iz Charente (Sonneville). Uporedivost s granulometrijom finog padinskog materijala (Sonneville)

Fig. 3. Evolution des courbes granulométriques des débris entre 0 et 500 cycles gel-dégel (avec gel jusqu'à  $-5^{\circ}\text{C}$ ) à partir d'un calcaire de Charentes (SONNEVILLE). Comparaison avec la granulométrie des lits de la grèze de SONNEVILLE

trie du lit maigre (aré) des grès lités des Charentes (GUILLIEN, LAUTRIDOU, 1974); elle correspond au stade final de la comminution, atteint en général pour les calcaires entre 200 et 300 cycles gel-dégel. Il s'avère donc possible de considérer la grèze comme le stade final de la comminution cryogénique, ne nécessitant pas des froids intenses (expérience de gel à  $-5^{\circ}\text{C}$  seulement) mais exigeant une alimentation en eau très importante vu le faciès de calcaires lithographiques des charentes à petits pores (types III a à III b) ne facilitant pas la recharge en eau des blocs.

L'explication de l'arrêt de la comminution peut être la suivante: lorsque les calcaires lithographiques éclatent en donnant de gros éléments, ce processus de désagrégation est définitivement stoppé (ce n'est pas le cas pour les craies); par contre l'écaillage (l'écorçage) de ces éléments se poursuit très activement.

L'épaisseur des écailles varie avec le protocole: les gels intenses et rapides provoquent un écaillage intense par écailles fines de 1 à 3 mm d'épaisseur; le gel plus lent et doux, qui a été adopté pour les calcaires des Charentes, donnent des écailles d'épaisseur plus variable (de 3 à 10 mm) et dans l'ensemble plus grande que dans le premier cas: la moyemme se situant entre 3 et 6 mm. La comminution s'arrête donc lorsque l'épaisseur de tous les éclats atteint cette épaisseur critique.

## 2) Les mécanismes de gel

Deux facteurs essentiels conditionnent donc la gélivité des roches:

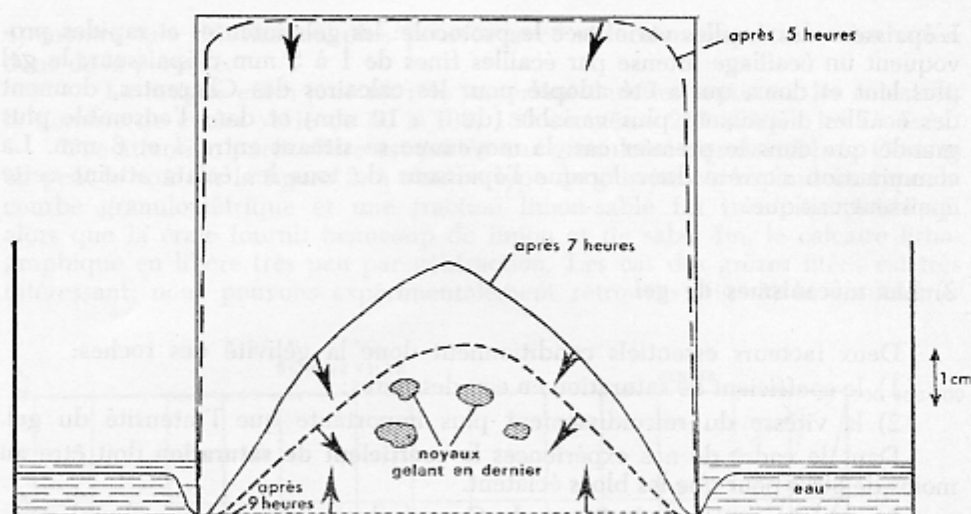
- 1) le coefficient de saturation en eau des pores;
- 2) la vitesse du refroidissement plus importante que l'intensité du gel.

Dans le cadre de nos expériences le **coefficient de saturation** doit être au moins de 80% pour que les blocs éclatent.

Les essais variés sur la Pierre de Caen (calcaire crayeux jurassique) montrent que l'efficacité des deux chambres froides à refroidissement lent était identique (gel à  $-8^{\circ}$  et à  $-30^{\circ}\text{C}$ ) alors qu'un gel rapide en enceinte thermique jusqu'à  $-10^{\circ}\text{C}$  seulement s'avérait plus destructeur que le protocole à  $-30^{\circ}\text{C}$  en chambre froide (LAUTRIDOU et al., 1975). Nous avons donc été amenés à étudier le bilan de l'eau dans les roches pendant les expériences.

En prenant comme roche témoin la Pierre de Caen, dont le comportement au gel est bien connu, nous avons étudié les processus limitant l'efficacité du gel (LAUTRIDOU et al., 1975). En effet le rôle de l'évaporation et de la «glace d'extrusion» nous paraissent importants. L'évaporation joue pendant le dégel, mais surtout pendant le gel avant que la surface du bloc soit gelée: l'évaporation peut éliminer plus de 10% du volume d'eau interne lorsque les blocs n'ont pas d'alimentation en eau par la base durant le gel. Lorsqu'il y a alimentation (protocole habituel) le chiffre peut encore atteindre 5%. Le deuxième processus concerne ce qui est appelé improprement «glace d'extrusion», qui forme une carapace de quelques millimètres d'épaisseur autour des blocs lorsque ceux-ci sont poreux et à pores assez gros (plus de 0,5 micron). Une étude sur modèle montré qu'en fait l'eau située à la surface des échantillons (au débouché des pores) et commençant à geler aspirait l'eau interne pour former cette carapace de glace qui peut correspondre à 6% du volume d'eau des blocs. Ainsi pendant les essais sur la Pierre de Caen, 8 à 10% du volume d'eau des roches est éliminé avant que la surface soit scellée définitivement par la glace et que le gel pénètre à l'intérieur. Ceci explique que les faciès les plus durs de la Pierre de Caen résistent fréquemment aux alternances gel-dégel. Les refroidissements rapides, limitant la durée d'évaporation et ne laissant pas le temps suffisant pour que le processus d'aspiration constitue la carapace de glace dite d'extrusion, provoquent donc une perte en eau bien plus faibles que les gels lents: ceci explique sans doute leur plus grande efficacité.

De nombreux enregistrements de température au sein des blocs (LAUTRIDOU et al., 1975) permettent de suivre la migration du front de gel dans les conditions de nos expériences. Ainsi dans le cas d'un refroidissement lent et doux (jusqu'à  $-7^{\circ}\text{C}$ ) en chambre froide le déplacement de l'isotherme  $0^{\circ}\text{C}$  est reconstitué sur la figure 4: la base du bloc, entourée d'eau, gèle nettement



Sl. 4. Migracija izoterme od  $0^{\circ}\text{C}$  u stjenovitom bloku okolice Caen-a od 1,5 kg, poroznosti 20% sa polaganim hlađenjem do  $-7^{\circ}\text{C}$ .

Fig. 4. Migration de l'isotherme  $0^{\circ}\text{C}$  dans un bloc de pierre de Caen de 1,5 kg, poreux (20%) avec refroidissement lent jusqu'à  $-7^{\circ}\text{C}$

après le sommet, et c'est dans la partie inférieure que s'effectue le blocage par le front de gel de noyaux qui gèlent en dernier; si ces noyaux sont saturés d'eau à plus de 91%, l'expansion de volume (9%) liée au passage eau-glace ne peut se faire, et il se produit des pressions provoquant l'éclatement des blocs. C'est actuellement notre interprétation des mécanismes du gel: elle nécessitera de nombreux autres essais sur modèles pour être étayée. Il existe d'autres hypothèses que nous avons rappelées dans le Bulletin du Centre N° 10 (avec une bibliographie détaillée) et qui ont trouvé des défenseurs pendant le Colloque du Havre sur la gélifraction (1975). Il est certain que de nombreux paramètres entrent en jeu et qu'il n'existe pas actuellement de théorie indiscutable. Les recherches actuelles du Laboratoire de cryoclastic portent dans cette direction tout en continuant les expériences sur les faciès divers apportés par différents chercheurs, et sur la forme et la granulométrie des gélifractions.

En conclusion, toutes ces recherches expérimentales n'ont d'intérêt qui si elles permettent d'expliquer des phénomènes naturels, et finalement les paysages. C'est pourquoi, parallèlement aux essais de laboratoire, des expériences de terrain ont été entreprises depuis plusieurs années sur ce thème.

A. PANCZA, Professeur à Neuchâtel, en Suisse, poursuit des observations sur une paroi rocheuse située à 1280 m d'altitude dans le Jura neuchâtelois.

Une base d'observation, comportant de nombreux repères, a été installée dans le Massif du Chambeyron par des Chercheurs du Centre de Géomorphologie et ceux du Département de Géographie de l'Université d'Aix-en-Provence.

Enfin, un grand nombre de Chercheurs, travaillant sur des terrains variés (Normandie, Bassin Parisien, Bourgogne, Charente, Pyrénées, Alpes, Jura, Rif marocain) adressent régulièrement au Centre de Géomorphologie des échan-



tilons à analyser ou des séries à expérimenter en commun. C'est en multipliant ce type de collaboration entre Chercheurs de terrain et expérimentateurs que des solutions satisfaisantes pourront être apportées à l'élaboration et à l'évolution morphoclimatique des paysages en roches calcaires.

#### BIBLIOGRAPHIE DES PUBLICATIONS SUR LES EXPERIENCES DU CENTRE SUR LES CALCAIRES

- AUBRY M. P., LAUTRIDOU J. P. (1974): Relations entre propriétés physiques, gélivité et caractères microstructuraux dans divers types de roches. *Bull. Centre Géom.*, n° 19, p. 7—16.
- COUTARD J. P., HELLUIN M., LAUTRIDOU J. P., PELLERIN J., (1970): Gélifraction expérimentale des calcaires de la Campagne de Caen. *Bull. Centre Géom.*, N° 6, p. 7—44.
- GUILLEIN Y., LAUTRIDOU J. P. (1969): Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie. I — Les calcaires des Charentes. *Bull. Centre Géom.*, N° 5, 50 p.
- GUILLEIN Y., LAUTRIDOU J. P. (1974): Conclusions des recherches de gélifraction expérimentale sur les calcaires des Charentes. *Bull. Centre Géom.*, N° 19, p. 25—34.
- LAUTRIDOU J. P. (1970): Gélivité de la craie de TANCARVILLE. *Bull. Centre Géom.*, N° 6, p. 45—61.
- LAUTRIDOU J. P. (1971): Recherches de gélifraction expérimentale au Centre de Géomorphologie V Conclusions générales, N° 10.
- LAUTRIDOU J. P. (1975): Les recherches de gélifraction expérimentale du Centre de Géomorphologie du C. N. R. S. Colloque international sur la gélifraction, Le Havre, Fondations Fr. Etudes Nordiques (sous presse).
- LAUTRIDOU J. P., LENEUF N. (1974): Microstructure et gélivité des calcaires lithographiques. *Bull. Centre Géom.*, N° 19, p. 17—23.
- LAUTRIDOU J. P., MAZO L., OZOUF J. C., BENOIT J. P. (1975): Etude des mécanismes de gel dans la Pierre de Caen. Colloque international sur la gélifraction, Le Havre, Fondation Fr. Etudes Nordiques (sous presse).
- MASSON M. (1975): Utilisation des ondes ultra-sonores pour le suivi de la propagation du front de gel dans les roches carbonatées. Colloque international sur la gélifraction, *ibid.*
- PANCZA A., LAUTRIDOU J. P. (1974): Gélifraction artificielle sur quelques molasses de Moyen Pays Suisse. *Bull. Soc. Neuchat. Géogr.*, t 54, fasc. 2, p. 89—99.

#### STUDIJE MEHANIČKOG I KEMIJSKOG RASPADANJA POD UTJECAJEM LEDA U GEOMORFOLOŠKOM CENTRU CNRS-a U CAEN-u

André Journoux i Jean-Pierre Lautridou

Francuski nacionalni centar za naučna istraživanja osnovao je na Geografskom odjelu Univerziteta u Caenu geomorfološki centar, u svrhu studiranja laboratorijski umjetno rekonstruiranog i kontroliranog procesa mehaničkog raspadanja, kao i kemijske dekompozicije stijenama u različitim klimatskim uvjetima. Naročita je pažnja obračena upravo vapnenačkim stijenama kako zbog njihove rasprostranjenosti, tako i zbog studiranja problema njihove topivosti, gelifrakcije i odgovarajućih forma nastalih tim procesima. Paralelno s radom laboratorija, gdje se vrši »mikroanaliza« organizirana su istraživanja »makroprocesa« na terenu. Postoje dvije stalne istraživačke baze (na Juri i Južnim vapnenačkim Alpama). Osim toga brojni geomorfolozi koji istražuju strukturu reljefa i procese njenog formiranja redovito šalju Centru uzorke za analizu. Kooperacija između eksperimentalnog laboratorijskog rada u Centru i terenskih istraživanja doprinosi uspješnim rezultatima u radu na spoznaji morfo-klimatske evolucije krških pejzaža.

Preveo: V. Rogić

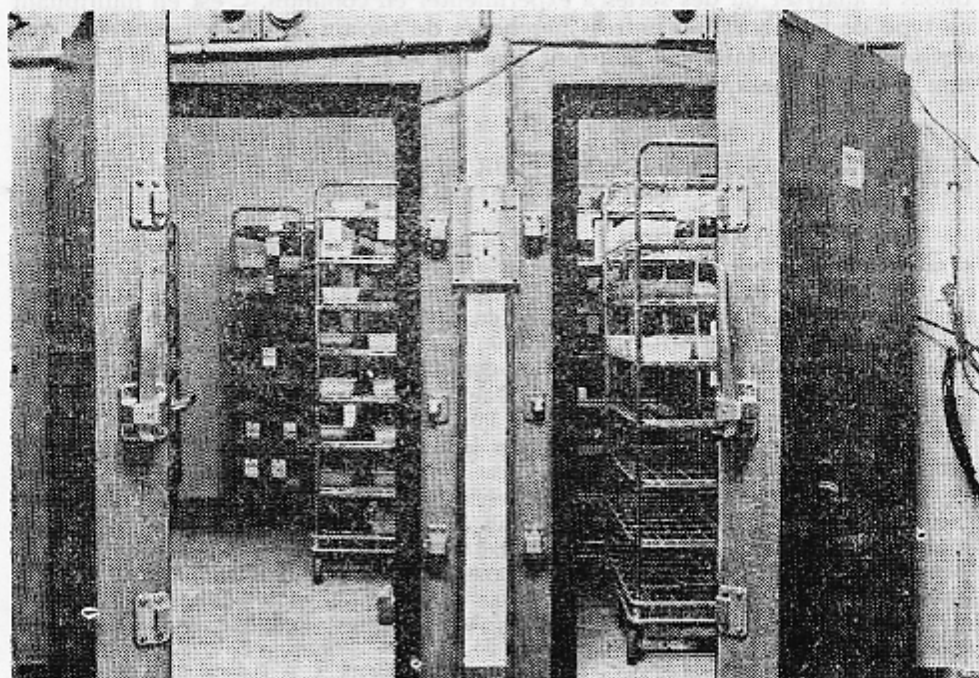
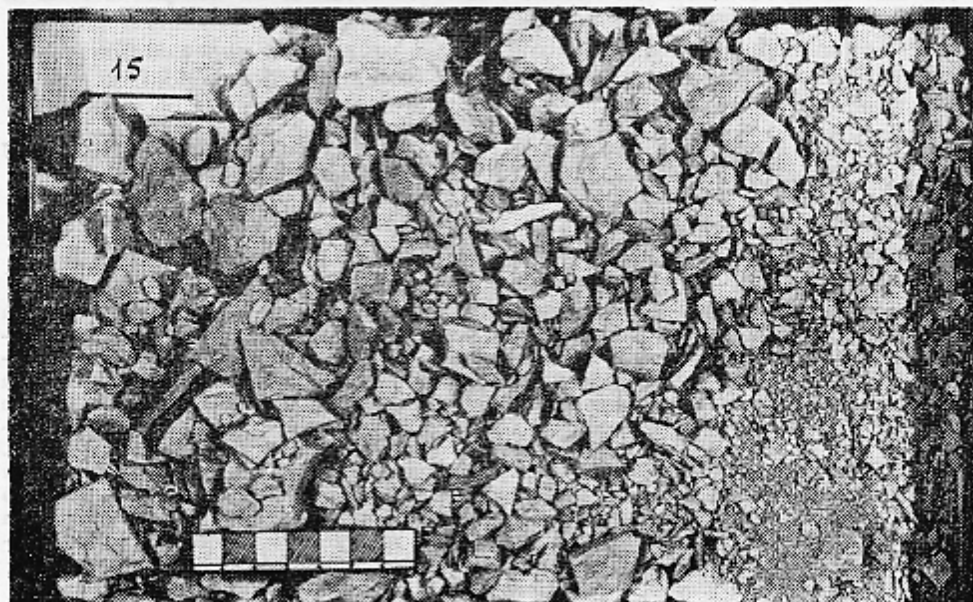


Photo 1. L'intérieur des Chambres froides

Foto 1. Unutrašnjost hladnjaka



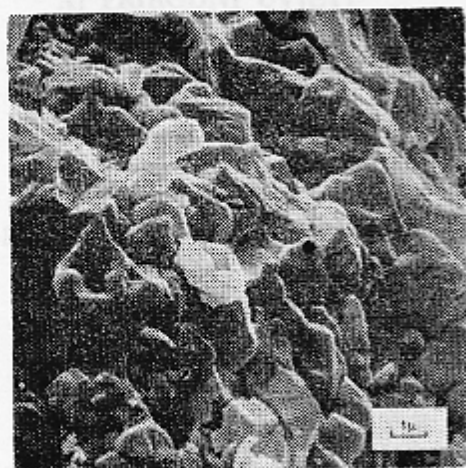


Foto 3. Fotografija elektronskim mikroskopom normandijske krede (Tancarville)  $6 \times 7.500$  (Foto M. T. Aubry)

Photo 3. Photographie au microscope électronique à balayage: craie de Normandie (TANCARVILLE)  $6 \times 7500$  (Photo M. T. AUBRY)

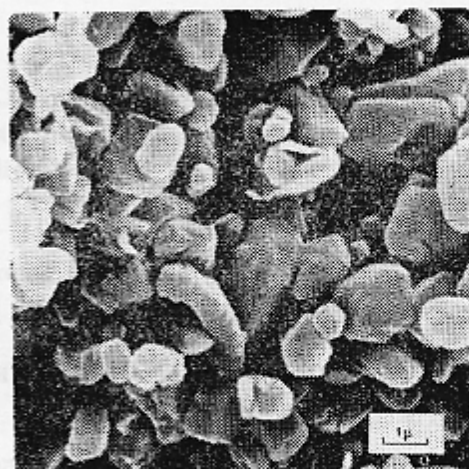


Foto 4. Fotografija elektronskim mikroskopom litografski vapnenac iz Charente, slabo porozan, vrlo tankih pora.

Photo 4. Photographie au microscope électronique à balayage: calcaire lithographique des Charentes, peu poreux et à pores très fins (Type III B, fig. 2)

Foto 2. Celifrakcije litografskog vapnenca iz Charente (Sonneville) nakon 500 ciklusa smrzavanja do  $-5^{\circ}\text{C}$  i odmrzavanja

Photo 2. Gélifraccts d'un Calcaire lithographique des Charentes (SONNEVILLE) après 500 cycles gel à  $-5^{\circ}\text{C}$  et dégel