

## L'origine des sols polygonaux et striés du Chambeyron (Basses-Alpes)

### Résultats d'expériences de terrain

par A. PISSART

Professeur associé à l'Université de Liège

Résumé. — *Diverses marques réalisées sur des sols structuraux périglaciaires de la haute vallée du Chambeyron ont permis de mettre en lumière les processus géomorphologiques qui interviennent dans leur formation.*

#### I. — Polygones décimétriques triés.

*En plusieurs endroits où les polygones ont été détruits, nous avons observé :*

- *la formation d'un réseau polygonal de fissures de retrait qui se conservent d'année en année, en s'ouvrant et se refermant ;*
- *l'apparition à la surface de cailloux soulevés par le gel ;*
- *le déplacement anarchique des cailloux à la surface du sol ;*
- *la descente de quelques cailloux dans les fissures de retrait.*

*Des cailloux peints enterrés au centre de polygones bien formés sont apparus en surface après un an, et sont arrivés dans les bordures caillouteuses après deux ans. Des couches de matériel coloré, disposées horizontalement au centre de petits polygones, ont été déformées en un an, en montrant l'existence de mouvement de masse au centre des polygones (fig. 4 et 5).*

#### II. — Polygones triés atteignant 1 mètre de diamètre.

*Des pierres peintes enterrées dans ces polygones apparaissent rapidement à la surface et se déplacent ensuite vers les bordures des petits polygones secondaires, où quelques-uns sont descendus à une profondeur de plusieurs centimètres en 5 ans. Un mouvement vers les bordures des formes les plus grandes semble se produire uniquement quand les centres sont bien bombés.*

#### III. — Sols striés décimétriques.

*De petits cailloux enduits de peinture enterrés dans les bandes fines apparaissent rapidement en surface, puis se déplacent vers les bandes*

caillouteuses. Le mouvement de descente du matériel le long de la pente est beaucoup plus rapide dans les bandes caillouteuses que dans les stries de matériel fin. Des mesures de la vitesse superficielle de descente des cailloux ont été obtenues pour diverses valeurs de pente (fig. 9).

IV. — Sols striés dont la largeur atteint 1 mètre.

*Des alignements peints sur les cailloux de surface ont montré que les stries de matériel fin descendent plus rapidement le long de la pente que les stries de matériel grossier (fig. 10). Des parallépipèdes de matériel coloré enfouis dans les bandes fines ont montré que ce mouvement est surtout rapide à proximité de la surface (fig. 11).*

*L'ensemble de ces observations a permis de préciser comment apparaissent et évoluent les petits polygones triés du Chambeyron (fig. 6). Elle a conduit l'auteur à formuler des hypothèses sur la formation des autres sols périglaciaires étudiés.*

\*  
\*\*

Summary. — *In the Chambeyron massif at 2 800 m above sea level, reference marks have thrown light on certain geomorphological processes which operate in the formation of periglacial patterned ground.*

I. — Polygons of several decimeters diameter (fig. 1).

- In places where polygons have been destroyed, we observed:*
- *the formation of a polygonal net of contraction cracks which persisted for years but opened and closed;*
  - *the appearance on the surface of pebbles uplifted by frost;*
  - *the indiscriminate movement of pebbles on the surface;*
  - *the sinking of some of the pebbles into the contraction cracks.*

*Painted pebbles buried in the centre of the well formed polygons appeared in one year on the surface and in a further two years reached the stony border. Coloured fine material placed in a regular layer at the center of small polygons showed the presence of mass movement in the center of the polygons (fig. 4 and 5).*

II. — Polygons of almost a meter diameter (fig. 2).

*Painted stones buried in these polygons appeared rapidly on the surface. Painted stones placed on the surface moved quickly to the borders of small secondary polygons where some have moved down to a depth of several centimeters in 5 years. The movement to the border of the larger forms occurred only where the centers were clearly domed.*

III. — Stripes of several decimeters width.

*Painted stones buried in the fine bands appeared rapidly on the surface and then moved to the stony bands. The rate of movement down-*

*slope was much greater in the stony bands than in the fine bands. Measurements of the rate of movement in the stony bands have been obtained for several slope values (fig. 9).*

IV. — Stripes of almost one meter width.

*Ten years observations of painted lines have shown that the fine bands move downslope more quickly than the stony bands (fig. 10). Vertical bands of coloured fine material showed that this movement was rapid only very close to the surface (fig. 11).*

*The combination of the observed processes enables one to explain the formation of polygons several decimeters diameter (fig. 8) and to speculate on the formation and evolution of the other forms.*

#### INTRODUCTION

Les sols polygonaux et striés de la haute vallée du Chambeyron sont connus depuis plus de 30 ans (Gignoux, 1936 ; Demangeot, 1941). En 1947, J. Michaud et A. Cailleux ont installé dans cette vallée divers repères (marques à la peinture, pierres peintes, plaquettes d'aluminium) dans le but de mesurer « les vitesses de déplacement des pierres dans les principaux types de formations superficielles en haute montagne » (J. Michaud et A. Cailleux, 1950). Ils ont publié, en 1950, les résultats des observations qu'ils avaient faites grâce à ces marques entre 1947 et 1949.

Bien qu'un grand nombre de repères inscrits par ces auteurs aient été conservés et soient toujours visibles aujourd'hui, ces chercheurs n'ont pas poursuivi cette étude. En 1963, A. Cailleux nous a communiqué les données donnant la description et la localisation des marques et nous avons pu mesurer les déplacements enregistrés de 1947 à 1963 (A. Pissart, 1964). A l'occasion de cette visite, nous avons installé de nouvelles marques, qui ont été suivies d'autres, mises en place au cours des visites que nous avons effectuées dans cette vallée en 1968, 1970, 1972 et 1973. Des résultats de ce travail ont été présentés en 1971 (A. Pissart, 1972). Dans la présente note, nous rappelons les résultats déjà publiés et nous donnons les observations nouvelles que nous avons recueillies en 1972 et 1973. Toutes ensemble, ces observations nous permettent, parmi d'autres résultats, d'expliquer comment se constituent et évoluent les petits polygones décimétriques.

#### I. — LES SOLS POLYGONAUX

Dans les notes publiées antérieurement sur les sols de la haute vallée du Chambeyron, il n'a pas été souligné clairement l'existence de

deux types de sols polygonaux. Cette distinction est cependant justifiée tout autant par l'aspect extérieur des formes que par leur vitesse d'évolution. Dans le présent article, nous établissons cette distinction et nous considérons successivement les sols polygonaux décimétriques et les sols polygonaux métriques ; les figures 1 et 2 montrent immédiatement qu'il s'agit de deux types de structures très différentes.

J. Michaud et A. Cailleux (1950) avaient disposé des marques uniquement dans les formes les plus grandes. Pour notre part, nous nous sommes, depuis 1963, beaucoup préoccupé de sols les plus petits, de taille décimétrique, qui évoluent très rapidement.

#### A. — LES SOLS POLYGONAUX DÉCIMÉTRIQUES.

*Description.* — Il existe dans la région étudiée des sols polygonaux décimétriques non triés et triés (classification de A.L. Washburn, 1956). Les premiers peuvent être dus à de simples fissures de retrait, sans présenter aucun caractère typiquement périglaciaire. Les seconds, par contre, (fig. 1), constitués d'une masse centrale de matériel fin, entourés de toutes parts de cailloux sans matrice, sont unanimement attribués à l'action du gel. Ce sont ces sols polygonaux dont le diamètre varie de 10 à 30 cm

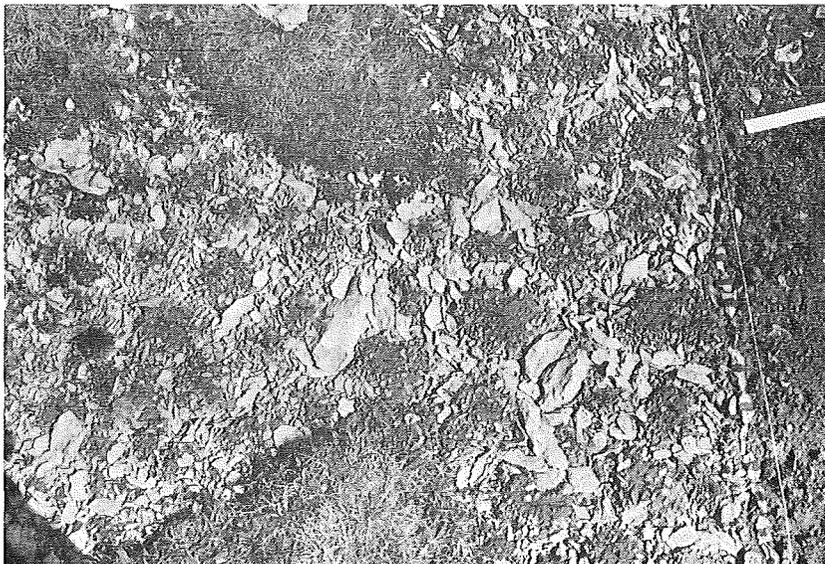


FIG. 1. — Photo d'un sol polygonal trié décimétrique au sein duquel des expériences ont été réalisées. La partie de la règle visible dans le coin supérieur droit de la photo a une longueur de 15 cm.



FIG. 2. — Photo d'un sol polygonal métrique qui a été marqué par J. Michaud et A. Cailleux en 1947. Des cailloux émergeant du sol verticalement témoignent de leur soulèvement par le gel.



FIG. 3. — Photo montrant l'excellent triage qui existe parfois en surface des polygones décimétriques triés. (La règle a une longueur de 30 cm).

que nous avons particulièrement étudiés. Le triage en surface peut être excellent (fig. 3) ou relativement médiocre. Il s'agit toujours de polygones « flottants », qui sont surtout bien développés sur les crêtes exposées à l'action du vent et où l'accumulation de neige est peu importante. Les formes les plus belles que nous avons observées et au sein desquelles nous avons réalisé beaucoup des expériences décrites ci-dessous, sont localisées sur un sommet, où l'action karstique ou glaciaire a creusé une cuvette de quelques décimètres qui retient beaucoup d'humidité. D'autre part, en cet endroit, la gélivation a libéré de nombreux petits fragments de calcaire dont la taille réduite permettait l'apparition de beaux sols polygonaux triés.

Ces petits sols polygonaux sont très fréquents dans la haute vallée du Chambeyron. Ils apparaissent sur des surfaces horizontales ou très peu inclinées qui peuvent être d'étendue fort réduite (0,25 m<sup>2</sup>). Ils ont été observés en des endroits où le matériel meuble surmontant le *bed rock* n'atteint pas 10 cm d'épaisseur.

*Les expériences réalisées.* — Au sein de ces petits sols polygonaux diverses expériences ont été effectuées. Nous les rapportons ci-dessous en passant plus rapidement sur celles qui ont été déjà décrites précédemment (A. Pissart, 1971).

1) En 1963, des sols polygonaux avaient été retournés à la bêche sur une superficie de 0,75 m<sup>2</sup>. En 1968, des polygones triés s'étaient reformés. Le triage se poursuivant par la suite, des polygones très beaux étaient reconstitués en 1973. Cette expérience avait montré la rapidité d'évolution du phénomène ; mais un doute subsistait, car en 1963, en retournant le sol rapidement à la bêche, des masses de matériel fin avaient sans doute été conservées.

2) En 1968, la même expérience était recommencée en un endroit voisin, en prenant toutefois la précaution de disperser parfaitement les masses de matériel fin et de mélanger uniformément cailloux et sédiments meubles.

Ce sol polygonal est en voie de reconstitution actuellement. Les processus suivants y ont été observés : a) ouverture de fissures de retrait ; b) apparition de cailloux de plus en plus nombreux en surface ; c) déplacement des cailloux à la surface du sol ; ces déplacements qui paraissent anarchiques amènent un certain nombre de cailloux dans les fissures de retrait ; d) descente des cailloux dans les fissures de retrait ; très souvent des cailloux basculent dans les fissures et s'y disposent verticalement ou sur la tranche.

3) En 1968, des cailloux se trouvant à la surface du sol ont été colorés sans être déplacés. A l'emplacement étudié, le sol était découpé par un réseau polygonal de retrait qui paraissait évoluer vers un sol trié péri-

glaciaire. Nous y avons observé au cours de 5 années les déplacements de cailloux, tantôt dans une direction, tantôt dans l'autre, déplacements qui amènent des éléments à tomber dans des fissures béantes.

4) Lorsqu'un sol polygonal est constitué, les mouvements des cailloux en surface ne sont plus anarchiques. Plusieurs expériences l'ont montré. En 1968, 50 cailloux colorés ont été placés en surface, au centre du matériel fin de petits polygones. Ils ont été rapidement déplacés vers les bordures caillouteuses. En 1973, 9/10 de ces cailloux avaient quitté le matériel fin et s'étaient disposés parfois verticalement dans des bordures grossières. Cette expérience conduite en deux sites différents a établi combien, en surface, les déplacements des cailloux sont rapides et a montré qu'ils s'effectuent depuis les centres fins vers les bordures grossières.

5) En 1968 et en 1970, en trois sites différents, des cailloux colorés ont été enfouis complètement au centre des petits polygones. Deux ans après la mise en place de ces cailloux, ils étaient tous apparus en surface et ils avaient commencé à se déplacer vers les bordures, comme dans les expériences mentionnées ci-dessus au point 4. Cinquante-et-un cailloux de 1 à 2 cm sont arrivés, 5 ans après l'enfouissement, dans les bordures grossières où, souvent, ils ont basculé et se sont disposés verticalement.

6) La comparaison de photos prises en 1968, 1970, 1972 et 1973 montre clairement que les fissures de retrait qui existent dans les sols périglaciaires en cours de formation s'ouvrent et se ferment. Leur ouverture est très différente selon les années. Ces mouvements ont peut-être pour effet de conserver ou de donner aux cailloux tombés dans les fissures une position verticale.

7) Diverses expériences ont mis en évidence l'existence de mouvements au sein du matériel fin qui forme le centre des polygones.

a) En 1968, un champ de petits polygones a été recouvert par une couche de petits cailloux. En 1970, les centres fins de ces petits polygones s'étaient soulevés et apparaissaient au milieu de ces cailloux. En 1972, les plages de matériel fin s'étaient élargies et, en 1973, des polygones triés absolument caractéristiques étaient reconstitués.

b) En 1972, de petits morceaux de papier d'étain ont été disposés horizontalement à une profondeur variant entre 1 et 2 cm dans les centres fins de petits polygones. En 1973, plusieurs de ces papiers avaient été déplacés notablement, et certains avaient pris une position verticale.

c) En 1972, du matériel retiré du centre des petits polygones a été coloré et disposé en une couche horizontale de 0,5 à 2 cm d'épaisseur au sein des formes d'où il a été extrait. Des déformations importantes de la couche colorée ont été observées un an plus tard, comme le montrent les figures 4 et 5. Ces couches colorées indiquent dans toutes les coupes observées un mouvement vers le haut des parties extérieures des couches

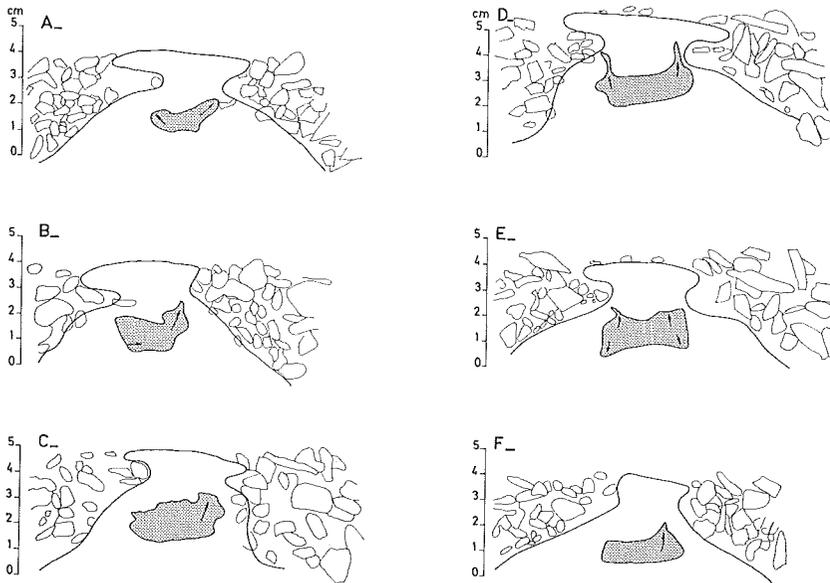


FIG. 4. — Coupes espacées de 0,5 cm au travers d'un sol polygonal décimétrique trié au sein duquel une couche de matériel coloré a été disposée horizontalement un an plus tôt. Les parties colorées sont figurées en grisé. Les flèches indiquent la direction des mouvements dévoilés par les déformations. Ces schémas ont été dessinés d'après des photographies prises sur le terrain.

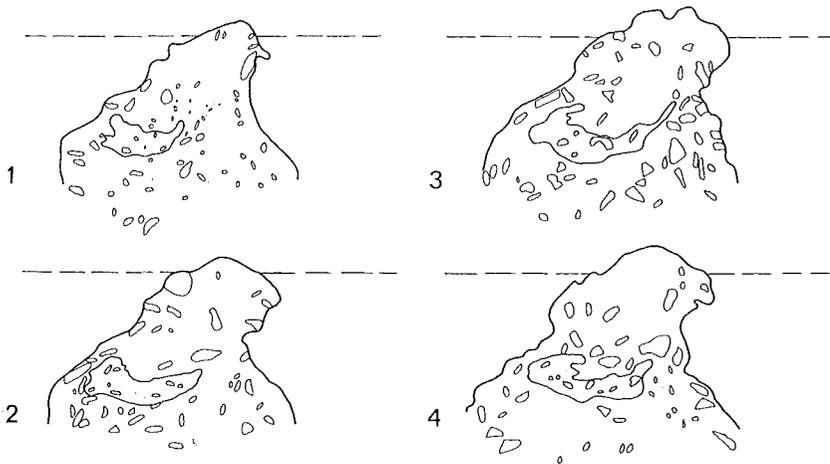


FIG. 5. — Coupes espacées de 1 cm au travers d'un sol polygonal trié au sein duquel nous avons disposé un an plus tôt une couche horizontale de matériel coloré. Les coupes ont été sciées en laboratoire au travers d'une masse indurée dans du plastique. Le pointillé indique le niveau approximatif des cailloux dans les bordures caillouteuses.

colorées. Beaucoup de profils montrent, en outre, l'étalement au-dessus des cailloux de bordure, de matériel fin qui, probablement, a été expulsé du centre des polygones. Ces déplacements correspondent parfaitement aux mouvements indiqués par les papiers d'étain et mentionnés ci-dessus.

*L'origine de ces polygones décimétriques.* — A la lumière des observations présentées ci-dessus, il est possible d'expliquer l'origine et le développement des sols polygonaux décimétriques triés de la haute vallée du Chambeyron. Voici comment nous pensons que ces formes apparaissent et évoluent (voir fig. 6).

1) *L'ouverture de fissures de retrait* constitue le point de départ (fig. 6 b). Ces fissures de retrait sont, sans doute, dues à des actions d'assèchement ou de gel. A.L. Washburn (1973, pp. 139-144) a souligné toute l'importance de la fissuration du sol dans l'apparition des sols polygonaux et a passé en revue les différentes causes de fissuration qui peuvent intervenir. Nous y renvoyons le lecteur.

2) *Le déplacement des cailloux en surface* sous l'action principalement des *pipkrakes* s'effectue de manière quelconque. Des cailloux sont cependant ainsi amenés à tomber dans les fissures de dessiccation. Simultanément, d'autres cailloux apparaissent en surface par le phénomène bien connu du soulèvement par le gel.

3) *Le soulèvement des centres des polygones* a été établi par plusieurs expériences que nous avons rapportées. Nos observations sont insuffisantes pour définir incontestablement tous les mouvements qui se produisent et les mécanismes qui les provoquent. Ce phénomène se réalise vraisemblablement lorsque des mouvements d'expansion sont contrariés par les cailloux tombés dans les fissures. Ce phénomène engendre la compression des centres fins des polygones et détermine le bombement du matériel fin vers la surface. L'ensemble des mouvements du matériel fin est représenté sur les figures 5c et 6d. Il est vraisemblable que cette action se produit au moment de la dilatation due au gel, car à ce moment, le sol est consolidé par le gel. Si le phénomène se produisait à la suite d'une dilatation par humidification, le sol plastique pénétrerait entre les cailloux.

Ce processus paraît, d'après nos observations, être fort rapide. Il compense l'action de la pluie qui entraîne le matériel fin sur la pente que constitue la surface de contact avec les cailloux sans matrice. Ce mouvement est rapide, si de nombreux petits cailloux tombent dans les fissures au moment des phénomènes de retrait.

Soulignons que les mouvements décelés sont de même type que ceux que nous avons reconnus dans les mêmes sols du Chambeyron (A. Pissart, 1964) en étudiant des profils dans des polygones affectant des horizons pédologiques.

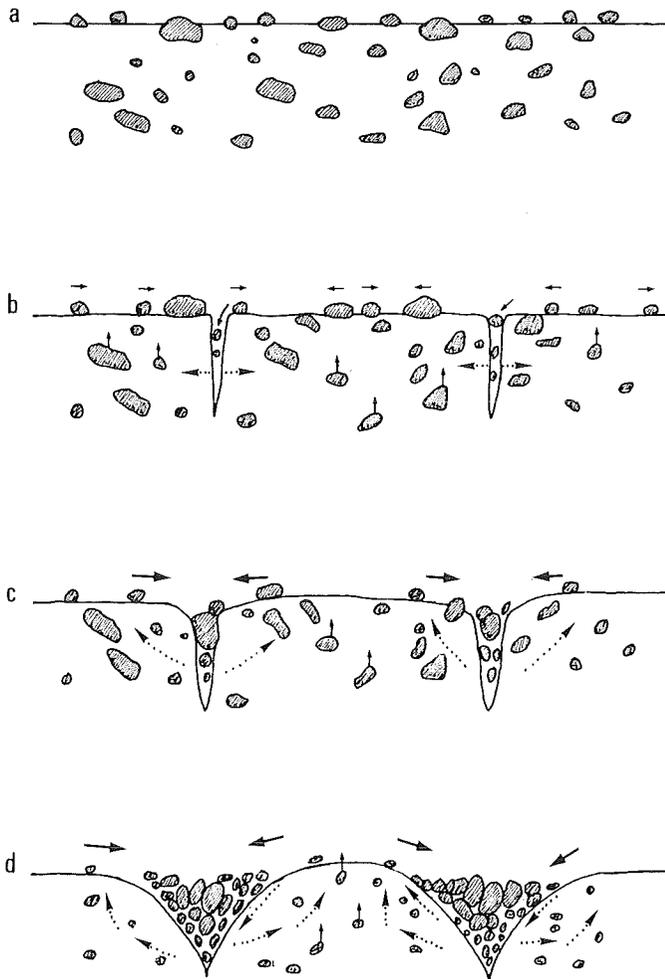


FIG. 6. — Schémas montrant comment apparaissent les sols polygonaux décimétriques du Chambeyron d'après les résultats de nos expériences. Processus actifs : 1. Soulèvement par le gel des cailloux (fig. a, b, c, d). Tous les cailloux sont mis en mouvement par ce processus, mais quelques flèches seulement indiquent ces déplacements. 2. Ouverture de fissures de retrait (fig. b). 3. Mouvements de masse déterminant l'élargissement des fissures de retrait et le bombement des centres (fig. c et d). 4. Déplacements en surface des cailloux par des pipkrakes; ces déplacements s'effectuent d'une manière quelconque quand le sol est horizontal (fig. a, b), radialement à partir des sommets des bombements (fig. c, d).

4) *Le bombement du centre des polygones accélère la descente des cailloux vers les fissures de retrait qui se transforment peu à peu en des bordures de cailloux (fig. 6c et 6d).*

En bref, nos observations établissent que dans la formation des sols triés décimétriques, les processus fondamentaux suivants interviennent : a) variation de volume du sol donnant les fissures de retrait initiales (dessiccation surtout) et engendrant des mouvements du matériel fin (action du gel principalement) ; b) sortie des cailloux par le gel (*frost heaving*) ; c) migration des cailloux en surface (*pipkrakes*).

L'activité simultanée de ces processus est indispensable pour que se constituent les polygones triés.

Cette explication génétique permet de comprendre comment sont déterminés divers caractères propres aux sols polygonaux.

1) Leur dimension est contrôlée par l'espacement originel des fissures de retrait. Celui-ci est imposé, sans doute, avant tout, par l'épaisseur du sol meuble (A. Pissart, 1964).

2) Une relation, déjà notée par divers auteurs (Corbel, 1966, p. 741), existe entre la taille des cailloux et la dimension des polygones. Nous pensons qu'un élément important de cette relation est que les cailloux doivent pouvoir descendre dans les fissures. Si les cailloux sont trop volumineux pour se glisser dans les fissures de retrait, il ne se produira pas de bombement des centres et l'évolution sera compromise.

Bien entendu, tous les cailloux que nous trouvons maintenant dans les bordures des polygones ne sont pas descendus dans les fissures. Certains se trouvaient déjà en cet endroit au début de l'évolution et la discontinuité qu'ils constituaient dans le milieu a pu déterminer la localisation en cet endroit d'une fissure de retrait.

Certains auteurs, dont Corbel en 1954 (rappelé par Tricart et Cailleux, 1961, p. 136), Philippi (1912) et von Drygalski (1904) (cité par Troll, 1958) ont invoqué l'action des tremblements de terre dans la formation des sols polygonaux. Cette influence n'est plus invoquée maintenant, mais il est possible que la descente et le tassement des cailloux dans les fissures soient facilités par l'action des secousses sismiques.

3) C'est sans doute la vitesse différente du *frost heaving*, en fonction de la taille des cailloux, qui détermine le triage qui, parfois, est très apparent au sein des bordures caillouteuses. En effet, comme la vitesse de sortie des éléments est d'autant plus rapide que les cailloux sont volumineux, les plus gros cailloux ont sans doute été les premiers à sortir du sol et à arriver dans les fissures (Pissart, 1964).

De nombreux auteurs ont écrit que les sols polygonaux dont nous venons de parler sont dus à l'action conjuguée de plusieurs processus. Citons entre autres H. Poser (1931, p. 226), A. Cailleux et G. Taylor (1953, p. 69), P. Bout (1953, p. 79), A.L. Washburn (1956, p. 938), etc.

Beaucoup ont invoqué avant nous, pour expliquer ces formes, l'ouverture de fissures de retrait, l'action des *pipkrakes*, les phénomènes de

trriage par le gel et le soulèvement de masse de matériel fin (voir à ce sujet A.L. Washburn, 1956 et 1973). Signalons comme assez proches de notre schéma d'apparition des petits sols polygonaux, les articles écrits par P. Bout en 1953 (pp. 79-80), par Gadbois et Laverdière, 1954 (p. 27) et par M.J.G. Chambers, 1966 (p. 20).

#### B. — LES SOLS POLYGONAUX MÉTRIQUES.

*Description.* — A côté des petits polygones dont nous venons de parler, existent en quelques rares endroits de la haute vallée du Chambeyron des polygones de plus grandes dimensions (fig. 2). Ce sont ces polygones que M. Gignoux avait signalé en 1937 et c'est sur des structures de ce type que A. Cailleux et J. Michaud ont installé des marques en 1947.

Les polygones triés ont un diamètre variant entre 1,5 m et 3 m. Ils sont situés uniquement sur le fond horizontal de cuvettes très humides. Ces cuvettes karstiques ou morainiques sont drainées souterrainement ; elles sont alimentées en eau pendant la majeure partie de l'été par la fonte des névés. Les polygones sont longtemps recouverts de neige et, après la fusion de celle-ci, ils restent immergés longtemps sous une nappe d'eau variant de quelques centimètres à quelques décimètres. Le matériel fin, argileux, y est très abondant. Il est apporté de nos jours par l'eau de fonte des névés et le ruissellement des versants.

Ces grands polygones sont généralement découpés en polygones plus petits, triés ou non triés, dont le diamètre varie de 80 à 30 cm. Les centres de ces polygones secondaires sont souvent nettement bombés. Quand il s'agit de polygones triés, les cailloux assemblés à la limite de ces petits polygones sont souvent de petite taille.

*Les expériences réalisées.* — 1) En 1970, 10 cailloux peints de 4,5 à 8,7 cm de longueur ont été enfouis verticalement au milieu d'un de ces grands polygones. Après la mise en place de ces cailloux, leur extrémité sommitale se trouvait à environ 1 cm sous la surface du sol. En 1973, 3 cailloux sur 10 étaient apparus en surface ; ils avaient subi en 2 ans des déplacements verticaux variant de 7 à 0,5 cm, avec une moyenne de 4,6 cm. La sortie des cailloux sous l'action du *frost heaving* est donc un processus très actif à proximité de la surface au centre de ces polygones. L'importance du phénomène apparaît d'ailleurs parfois par le grand nombre de cailloux dressés qui pointent hors du sol (fig. 2).

2) A. Cailleux et J. Michaud avaient entrepris l'étude des mouvements se produisant à la surface de ces grands polygones. En 1950, ils ont signalé que, de 1947 à 1949, seulement deux parmi les six sols qu'ils avaient marqués avaient subi une évolution décelable. Cette évolution avait consisté dans le déplacement de cailloux vers la périphérie et, dans un cas, dans l'enfouissement au sein du matériel fin de quelques cailloux.

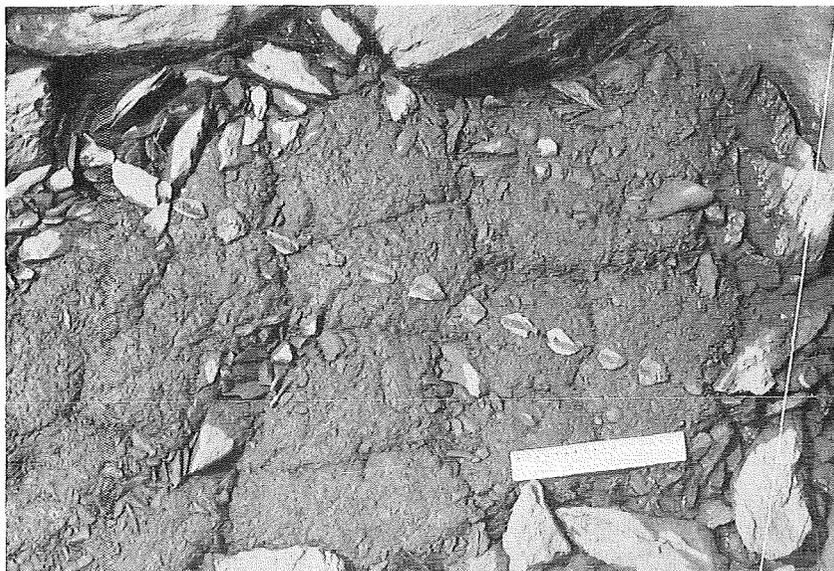


FIG. 7. — Photo prise en 1968, montrant la position de cailloux colorés déposés au centre d'un grand polygone découpé par de petits polygones secondaires.



FIG. 8. — Photo prise en 1973 du polygone que montre la figure 7. Les cailloux alignés en 1968 ont migré dans les creux qui limitent les polygones secondaires.

En 1963 et en 1973, un de ces sols marqués en 1947 a été observé. Les cailloux étaient toujours en surface. Les déplacements des six cailloux vers la périphérie ont varié de 0,25 à 2 cm par an pour la période 47-49 (J. Michaud et A. Cailleux, 1950) et de 0,5 à 1,6 cm pour la période 1947-1963 (moyenne 0,4 cm/an) ; de 1963 à 1973, si certains cailloux ont continué à migrer vers les bordures (0,6 cm/an au maximum), d'autres s'en écartaient (0,9 cm/an au maximum), de telle sorte que le mouvement moyen était un mouvement centrifuge de 0,2 cm/an. Ces observations répétées montrent que le mouvement, rapide au départ, peut diminuer considérablement lorsque la période d'étude s'allonge. En fait, ces mouvements à première vue anarchiques, sont contrôlés avant tout par le réseau de petits polygones qui découpent la grande forme étudiée.

3) En 1968, nous avons aligné à la surface de deux de ces grands polygones, respectivement 12 et 27 cailloux colorés de petite taille (1 à 2 cm). En 1973, tous ces cailloux étaient localisés dans les creux qui constituent les bordures du réseau polygonal secondaire. Dans la première expérience, 10 cailloux étaient encore visibles en surface, deux étaient descendus dans les fissures secondaires (fig. 7 et 8). Dans la seconde expérience, 25 cailloux ont été retrouvés, dont 7 descendus dans des fissures à des profondeurs variant de 3 à 1 cm ; les 2 cailloux manquants se trouvaient certainement enfouis dans des fissures identiques ; ils n'ont pas été recherchés pour ne pas perturber définitivement le sol étudié.

Ces expériences montrent incontestablement l'évolution rapide des petits polygones secondaires. Elles établissent la migration des cailloux sur les pentes de formes bombées, leur accumulation dans les creux séparant les petits polygones et leur enfouissement en cet endroit si leur taille est assez petite.

Par contre, des indices d'évolution des grands polygones n'ont pas été enregistrés.

*Interprétation.* — Les grands polygones du Chambeyron ne subissent guère d'évolution décelable ; seuls les petits polygones décimétriques secondaires évoluent rapidement de nos jours. Les processus qui interviennent ne paraissent pas fondamentalement différents de ceux que nous avons observés dans les petits polygones décimétriques. Il s'agit :

- 1) De variation de volume du matériel meuble donnant : a) l'ouverture de fissures de retrait et surtout, b) des mouvements du matériel fin engendrant le bombement des centres fins.
- 2) La migration des cailloux par le gel au sein du matériel fin et leur apparition à la surface.
- 3) Le déplacement des cailloux à la surface, radialement depuis le centre des polygones, en relation avec le relief de ces polygones.

4) La descente verticale des petits cailloux dans les fissures séparant les petits polygones.

Le processus fondamental est donc le bombement des centres des polygones qui se produit sans doute au moment du gel à la suite d'une augmentation de volume. Ce bombement est peut-être une conséquence de la descente des cailloux dans les fissures d'une manière identique à ce qui se produit pour les petits polygones décimétriques que nous avons décrits précédemment.

## II. — LES SOLS STRIÉS

De même qu'il existe dans la haute vallée du Chambeyron des sols polygonaux de petite et de grande dimension qui diffèrent par leurs caractères extérieurs et par leur évolution, de même deux types de sols striés peuvent y être distingués. Les premiers ont de un à quelques décimètres de largeur et correspondent aux petits sols polygonaux dont nous avons décrit l'évolution au début de cet article ; les seconds sont plus grands et leur largeur peut dépasser un mètre. Nous présenterons successivement les résultats de nos expériences dans chacune de ces formes.

### A. — LES SOLS STRIÉS DÉCIMÉTRIQUES.

Les sols striés (triés) de petite taille, parfois simplement ébauchés, parfois très nets, sont très fréquents au-dessus de 2 750 mètres. Ils existent sur des pentes variant de 2° à 30° et passent, lorsque la pente devient plus faible, aux sols polygonaux décimétriques dont il a été question plus haut.

J. Michaud et A. Cailleux (1950) avaient constaté qu'un sol strié de ce type qu'ils avaient bouleversé, s'était reconstitué après deux ans. Sur la pente de 15° où ils avaient réalisé cette expérience, ils avaient noté que les stries étaient réapparues dans le prolongement de stries anciennes.

Plusieurs sols bouleversés d'une manière identique en 1963 et 1968 ne se sont pas reconstitués aussi rapidement. En trois sites différents, sur des pentes de 3°, 6° et 14°, nous avons constaté la reconstitution de stries uniquement par la descente des structures non perturbées s'avancant dans la zone retournée située en contrebas ; la zone retournée progresse elle-même vers le bas sans qu'apparaissent des signes de reconstitution des stries. Nos observations indiquent donc que ces sols striés bouleversés ne se reconstituent pas toujours aussi rapidement que J. Michaud et A. Cailleux l'avaient observé.

Nos observations de 1972 et 1973 confirment entièrement ce résultat que nous avons déjà énoncé en 1971 (A. Pissart, p. 260).

Rappelons, d'autre part, qu'en 1971, nous avons montré (p. 260) que des petits cailloux colorés enfouis au milieu des stries de matériel fin, ne tardaient pas à en sortir et qu'ils migraient rapidement vers les stries de cailloux. Preuve évidente de l'action du soulèvement des cailloux par le gel et de l'action des *pipkrakes* dans l'évolution de ces structures.

En 1963 et 1971, nous avons noté également combien paraissait grande la vitesse de déplacement des cailloux compris dans les sols striés. Des marques diverses sur des sols striés répartis sur des pentes variant de 3 à 18° nous ont donné les vitesses moyennes de progression des cailloux qui sont rassemblées sur la figure 9. Ce tableau représente des vitesses

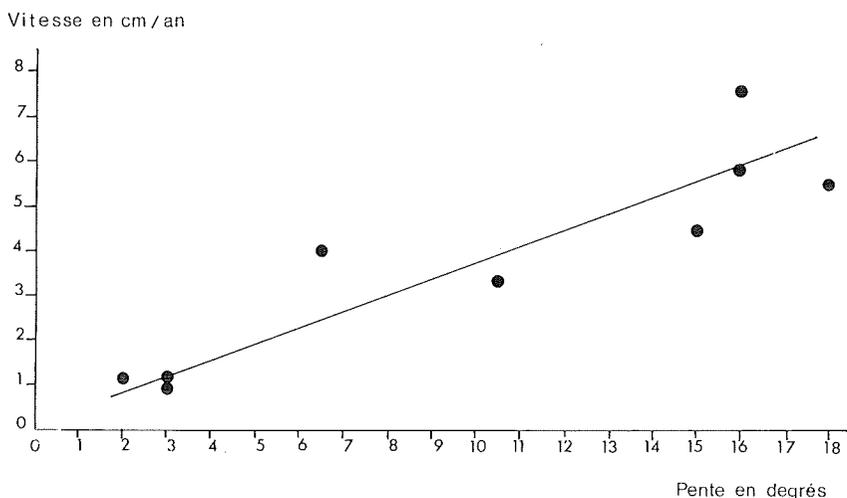


FIG. 9. — Vitesse moyenne de descente le long de la pente de cailloux localisés dans les bordures grossières de plusieurs sols striés décimétriques.

moyennes qui ont été obtenues en divisant par le nombre de cailloux considérés la somme des distances parcourues par les cailloux marqués. Ce graphique donne donc les vitesses moyennes des cailloux de surface ; il faut souligner qu'un caillou pris individuellement peut avoir une vitesse bien supérieure ou bien inférieure aux valeurs données dans ce tableau.

Les stries grossières constituées de cailloux sans matrice progressent plus rapidement le long de la pente que les stries de matériel fin. Cette observation a été confirmée de nombreuses fois par le déplacement plus rapide des cailloux au centre des stries de matériel grossier, plus lent à proximité des bordures de matériel fin et, plus lent encore, lorsque ces éléments restent sur ces bordures.

*Interprétation.* — Nos expériences ont fourni actuellement des données sur les déplacements de cailloux et la vitesse de progression du matériel grossier des sols striés. Cette vitesse de progression est rapide par rapport à ce qui se produit en dehors de telles structures. Elle est en relation directe avec la valeur de la pente (fig. 9).

Nous avons pu voir par nos expériences que le matériel grossier des sols striés décimétriques avance plus rapidement que le matériel des bandes fines. Nous avons établi précédemment la migration des cailloux vers la surface au sein des bandes de matériel fin et leur déplacement rapide vers les bandes grossières. Des marques ont été disposées pour reconnaître les mouvements de masse qui affectent le matériel fin, mais des résultats ne seront obtenus qu'en 1975.

Nous croyons que les mécanismes donnant naissance à ces sols striés sont très voisins de ceux qui sont responsables des sols polygonaux décimétriques au point que la figure 6 reste applicable à un sol strié, du moins s'il est considéré dans un plan perpendiculaire à la pente. Il s'agit sans doute :

- 1) de l'ouverture d'un réseau polygonal de fissures de retrait ;
- 2) de la migration des cailloux vers la surface par les phénomènes de soulèvement par le gel ;
- 3) de déplacements des cailloux en surface qui en amènent certains dans les fissures de retrait ;
- 4) de mouvements plastiques du matériel fin amenant le soulèvement des bordures de matériel fin ;
- 5) au moment du dégel, de la descente du matériel fin suivant la pente. Ce phénomène entraîne la fermeture des fissures perpendiculaires à la pente. Dans ces fissures refermées, les cailloux repris par les mécanismes responsables du soulèvement sont de nouveau expulsés. Ils migrent alors dans les fissures parallèles à la pente qui sont les seules à se conserver.

La pente aurait donc pour effet essentiel de refermer les fissures qui se sont développées parallèlement à l'inclinaison du versant.

## B. — LES GRANDS SOLS STRIÉS.

Les grands sols striés sont relativement rares dans la région étudiée. Il en est cependant quelques-uns, vers 2 950 m d'altitude, au-delà du col de la Gypierre, c'est-à-dire en Italie, mais à proximité immédiate de la vallée du Chambeyron.

Les bandes de matériel fin varient entre 20 cm et 100 cm de largeur. Elles alternent avec des stries de cailloux sans matrice dont la largeur peut dépasser un mètre. Le triage est généralement très net.

*Les expériences réalisées.* — En 1963, des lignes de couleur ont été tracées sur une quinzaine de mètres de longueur au travers de ces sols

striés. La progression des cailloux colorés a été suivie en 1968, 1970, 1972 et 1973. La figure 10 représente les déplacements qui ont été observés en 1968, 1972 et 1973. Contrairement à ce qui a été noté en 11 endroits différents sur de petits sols striés, le déplacement du matériel fin vers l'aval est plus rapide que le déplacement du matériel grossier. En

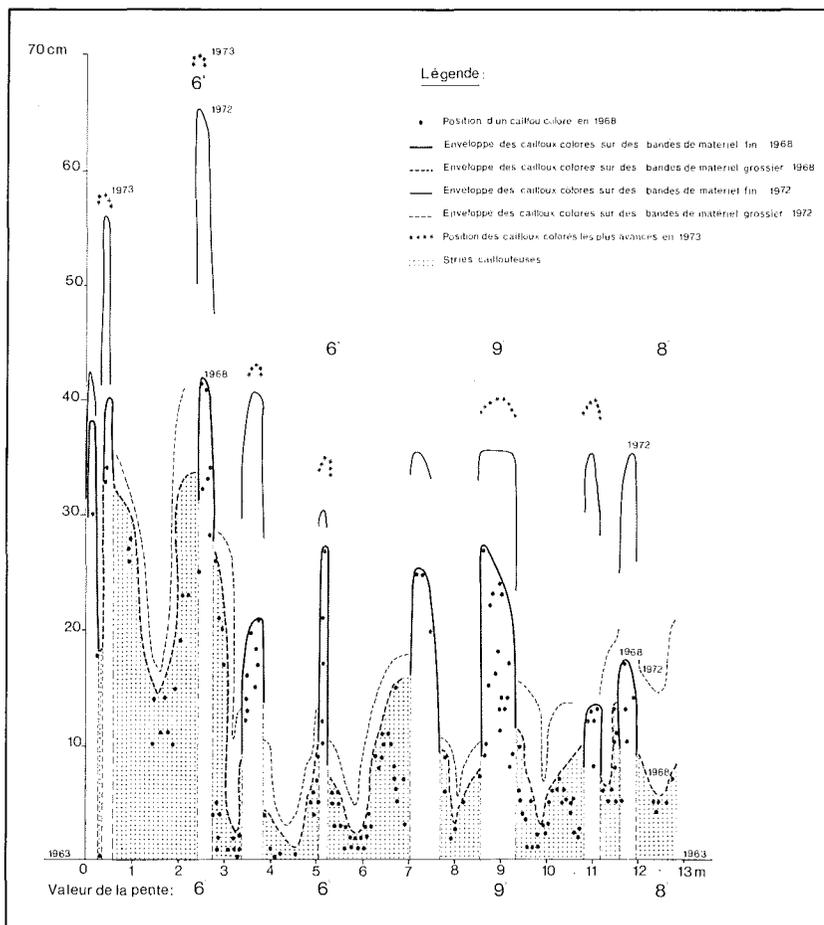


FIG. 10. — Déplacements des cailloux à la surface d'un sol strié de grande dimension à proximité du col de la Gypière. L'abscisse représente la localisation d'une ligne colorée en 1963. Les lignes de 1968, 1972 et 1973 sont dessinées de façon à englober tous les cailloux colorés. Elles donnent donc la vitesse des cailloux qui ont subi les plus grands déplacements. Beaucoup d'éléments avaient enregistré un déplacement moins grand et étaient repartis dans la zone comprise entre l'abscisse et les courbes enveloppes. Remarquer que l'échelle est 25 fois plus grande selon l'ordonnée pour mettre en évidence les mouvements enregistrés. Les valeurs de pente inscrites donnent l'inclinaison du sol strié en différents endroits.

10 ans, sur une pente variant de 6 à 9°, la vitesse maximum du matériel grossier est de 3,5 cm par an, alors que celle des cailloux disposés sur le matériel fin a atteint 7 cm par an. La progression moyenne des cailloux se déplaçant le plus vite est de 2 cm par an pour le matériel grossier et de 4 cm par an pour le matériel fin. La photo que nous avons publiée en 1971 (p. 263) montrait clairement l'avance moins rapide des cailloux en bordure du matériel fin.

En 1972, des marques ont été installées au sein des stries de matériel fin pour voir les mouvements de masse qui s'y produisent. Les premières marques réalisées ont consisté dans la disposition verticale de papier d'étain de 1 cm de largeur et de 6 cm de longueur. En 1973, ces papiers apparaissaient en surface sur une longueur de 4 à 6 cm avec un mouvement plus important au centre des stries qu'en bordure (fig. 11) ; cette extraction des papiers montre l'existence d'un soulèvement par le gel extrêmement important, car seul ce processus peut rendre compte de l'exhumation de ces papiers. En outre, leur alignement témoignait d'une avance différentielle des papiers vers l'aval, le mouvement étant plus important au centre des stries fines que sur les côtés.

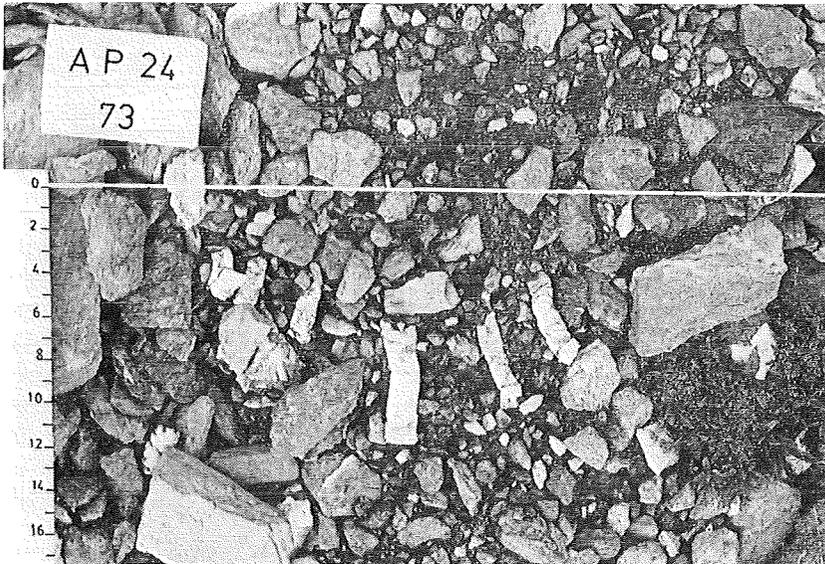


FIG. 11. — Photo d'un grand sol strié prise en 1973. En 1972, les bandes de papier d'étain visibles en surface ont été enfouies verticalement dans le sol à l'emplacement de la corde. Celle-ci est tendue perpendiculairement à la ligne de plus grande pente. En un an, ces bandes de papier d'étain sont donc sorties du sol d'une longueur qui atteint 6 cm et ont été déplacées dans le sens de la pente d'une distance qui varie de 6,5 cm au centre de la bande de matériel fin à 2,5 cm en bordure de celle-ci.

Les déplacements subis par ces papiers d'étain résultent à la fois du soulèvement du sol par le gel et de son déplacement le long de la pente. Cette technique ne permet pas de séparer le soulèvement du papier et le déplacement subi par les parties fines du sol. Ce déplacement a été mis en évidence par une dernière expérience qui a consisté dans l'introduction au sein des bandes de matériel fin de parallépipèdes de matériel coloré. Un an après l'introduction de ces masses, les déplacements étaient appréciables et montraient un mouvement beaucoup plus rapide près de la surface qu'en profondeur. Ce mouvement était également plus important au centre que près des bordures grossières (fig. 12).

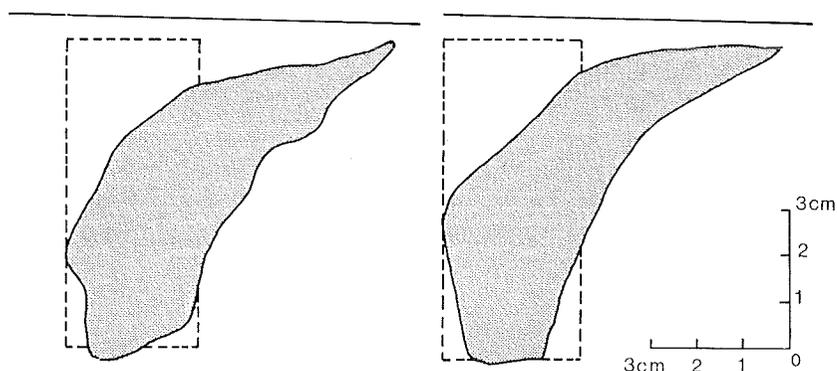


FIG. 12. — Coupes parallèles, distantes de 2 cm l'une de l'autre, montrant les déformations subies en un an par un parallépipède de matériel coloré enfoui dans le sol strié que montre la figure 11. Les pointillés montrent la disposition originelle du sol coloré.

*Commentaires.* — L'apparition de ces grands sols striés n'est certainement pas contrôlée par l'apparition de fissures de dessiccation. La masse de cailloux est beaucoup trop importante et il est vraisemblable que cette structure commence par un phénomène d'ascension du matériel fin au sein du matériel grossier comme il s'en produit dans les cercles de pierres. Ce phénomène est suivi de la descente et de la déformation de ces structures sur la pente, descente plus rapide pour le matériel fin que pour le matériel grossier. La grande vitesse de déplacement enregistrée est surtout superficielle et semble liée au soulèvement par le gel qui est très important à la surface de ces formations.

#### CONCLUSIONS

Les expériences dont nous venons de rapporter les résultats confirment l'origine complexe des sols structuraux périglaciaires. A côté des

mouvements des cailloux dont les déplacements ont été reconnus, nous avons démontré l'existence et la direction de mouvements de masse qui affectent le matériel fin ; or, ces mouvements sont très mal connus. La méthode consistant à disposer dans le sol des couches colorées est susceptible d'apporter dans ce domaine des observations fondamentales. C'est pourquoi de nouvelles marques ont été établies ; nous espérons qu'elles permettront au cours des prochaines années de préciser les déformations subies et de déduire les mécanismes physiques qui interviennent.

Les mouvements du matériel fin que nous avons observés, ont consisté essentiellement en des mouvements ascendants au sein de matériel grossier. Ce type de mouvement, dont l'existence a été observée depuis longtemps dans la formation des cercles de pierres, est un processus fondamental dans l'apparition de nombreuses structures périglaciaires. Ce mécanisme joue sûrement aussi un rôle capital dans l'apparition des cryoturbations. Il est vraisemblable que la détermination précise de la genèse des différents sols structuraux et des cryoturbations permettra de rapprocher dans une classification génétique des formes et des structures, qui actuellement encore paraissent très éloignées les unes des autres.

## BIBLIOGRAPHIE

- P. BOUT. — *Etudes de géomorphologie dynamique en Islande*, dans *Actualités scientifiques et industrielles*. Coll. Hermann, Paris, 1953, 220 p., 43 fig., 22 pl.
- A. CAILLEUX et G. TAYLOR. — *Cryopédologie - Etudes des sols gelés*, dans *Actualités scientifiques et industrielles*. Coll. Hermann, Paris, 1954, 218 p., 115 fig., 12 ill.
- M.J.G. CHAMBERS. — *Investigations on patterned ground at Signy island, South Orkney Island*, dans *British Antarct. Surv. Bull.*, n° 12, 1967, pp. 1-22.
- J. DEMANGEOT. — *Contribution à l'étude de quelques formes de nivation*, dans *Revue Géogr. alpine*, t. 2, 1941, pp. 337-352.
- C. LAVERDIÈRE et P. GADBOIS. — *Esquisse géographique de la région de Floeberg Beach, Nord de l'île Ellesmere*, dans *Geographical Bulletin*, Ottawa, n° 6, 1954, pp. 17-44.
- M. GIGNOUX. — *Un bel exemple de sols polygonaux dans les Alpes françaises*, dans *Bull. Soc. Scient. du Dauphiné*, n° 56, Grenoble, 1936, pp. 453-464.
- J. MICHAUD et A. CAILLEUX. — *Vitesse des mouvements du sol au Chambeyron (Basses Alpes)*, dans *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, t. 230, p. 314-315, séance du 16 janvier 1950, pp. 314-315.
- A. PISSART. — *Vitesse des mouvements du sol au Chambeyron (Basses Alpes)*, dans *Biuletyn Peryglacjalny*, n° 14, 1964, pp. 303-309.
- A. PISSART. — *Contribution expérimentale à la connaissance de la genèse des sols polygonaux*, dans *Ann. Soc. géol. Belg.*, t. 87, 1964, pp. 213-223.
- A. PISSART. — *Vitesse des mouvements de pierres dans des sols et sur des versants périglaciaires au Chambeyron (Basses Alpes)*, dans *Les Congrès et Colloques de l'Université de Liège*, Vol. 67, 1972, pp. 251-268.
- C. TROLL. — *Structure soils, solifluction and frost climates of the earth*, dans *U.S. Army, snow, ice and permafrost research establishment. Translation 43*, octobre 1958, 121 p.
- A.L. WASHBURN. — *Classification of patterned ground and review of suggested origins*, dans *Geol. Soc. America Bull.*, 67, 1956, pp. 823-865.
- A.L. WASHBURN. — *Periglacial processes and environments*, Editor E. Arnold, 25, Hill street, London, 320 p., 1973.

