

MICHEL BROCHU*
Paris

DISPOSITION DES FRAGMENTS ROCHEUX DANS LES DÉPÔTS DE SOLIFLUXION, DANS LES ÉBOULIS DE GRAVITÉ ET DANS LES DÉPÔTS FLUVIATILES: MESURES DANS L'EST DE L'ARCTIQUE NORD-AMÉRICAIN ET COMPARAISON AVEC D'AUTRES RÉGIONS DU GLOBE

Résumé de l'auteur

Les résultats de plusieurs séries de mesures effectuées dans la partie orientale de l'Arctique nord américain entre les 62° et 81° Nord, soit au Nouveau-Québec, sur l'île de Baffin et sur l'île d'Ellesmère, sont les suivants: l'axe principal des fragments rocheux (galets, 2 à 20 cm, et blocs > 20 cm) est parallèle à la plus grande pente (angle de moins de 45° avec celle-ci) dans une proportion (valeur médiane) de 79,5 % pour les dépôts ou coulées de solifluxion, de 36 % dans les éboulis de gravité et de 33 % dans les dépôts fluvio-glaïaires ou fluviatiles actuels. Les médianes obtenues concordent dans l'ensemble avec des mesures analogues réalisées dans d'autres parties du Globe; on note une médiane légèrement plus faible pour la solifluxion fossile (75 %) que pour la solifluxion active (79 %); enfin, dans les éboulis de gravité de l'Arctique nord-américain, l'orientation dominante est peu nette relativement aux données des autres Auteurs, mais bien individualisée par rapport à la solifluxion et aux dépôts fluvio-glaïaires.

Abstract

The results of numerous series of measures done in the Eastern part of the North American Arctic between 62° and 81°N, in Nouveau-Québec, on Baffin and Ellesmere Islands are as follows: the main axis of rock fragments (pebbles 2 – 20 cm and blocks > 20 cm) is parallel to the greatest slope (i.e: angle of minus 45° with it) in a proportion (median value) of 79.5 % in solifluction deposits, 36 % on gravity slope debris and 33 % in fluviatile or fluvio-glacial Holocene deposits.

These medians correspond, on the whole, with similar measures taken in other parts of the world. However, slightly lower median is noted for the fossil solifluction (75 %) in comparison with active solifluction (79 %) and, finally, in the gravity slope debris there is no predominant orientation in the Arctic, in opposition with other authors' data, but, however, they are well differentiated with respect to solifluction and fluvio-glacial deposits.

INTRODUCTION

Les travaux d'installation consécutifs au développement des régions arctiques et subarctiques du Globe ont été accompagnés d'erreurs d'aménagement qui ont conduit à des pertes considérables.

Ces erreurs étaient imputables à la méconnaissance de la dynamique propre à ces régions, de plusieurs agents climatiques et morphologiques: c'est ainsi que la solifluxion a fait glisser des constructions sur les pentes, que les fondations de ciment ont été fracturées, fissurées par la solifluxion et par les alternances gel – dégel, que d'autres constructions, comme cette école de Koartac, au Nouveau-Québec, ont été édifiées sur des terrains

* Centre d'Etudes Arctiques, Ecole Pratique des Hautes Etudes (La Sorbonne).
6, rue de Tournon, Paris VIe.

inondables au printemps et qu'elles ont dû être rebâties sur un nouvel emplacement.

Dans le cadre de ce travail, nous étudierons un des principaux caractères mesurables, quant à leur mise en place, de trois types de dépôts des régions arctiques et subarctiques de l'Est de l'Arctique nord-américain (Nouveau-Québec, îles de Baffin et d'Ellesmère). Nous prendrons, comme éléments de base, les coulées ou dépôts de solifluxion qui présentent, à tous égards, un des obstacles majeurs aux constructions à édifier dans l'Arctique, puis nous établirons des comparaisons avec certains dépôts de solifluxion fossile, avec les éboulis de gravité et avec les dépôts fluviatiles.

En conclusion, nous dégagerons les applications qui sont susceptibles d'aider l'ingénieur, l'architecte et les entrepreneurs dans la réalisation rationnelle de leurs projets dans les régions arctiques et subarctiques.

ANALYSE DESCRIPTIVE

LES DÉPÔTS DE SOLIFLUXION

Description générale

La solifluxion signifie, comme son étymologie l'indique, l'état de fluence (ou d'écoulement lent) d'un sol sur une pente.

Ce phénomène est connu depuis bientôt un siècle et a fait l'objet de nombreuses descriptions régionales, notamment dans les régions polaires, subpolaires ou de hautes montagnes, caractérisées par les traits suivants :

(a) Le terrain est en pente; les auteurs ont observé les dépôts ou coulées de solifluxion sur les pentes comprises entre 3° et 24° sexagésimaux : André CAILLEUX et Gérald TAYLOR (1954) et Louis LLIBOUTRY (1965); c'est une propriété essentielle, puisqu'il faut une pente minimale pour qu'il y ait solifluxion et, qu'au-delà de 24° , la gravité prend progressivement plus d'importance que la fluence.

(b) Ce sont les formations meubles qui fluent.

(c) Le sol est humide, au moins à certaines saisons, puisque l'humidité est aussi une propriété essentielle à la fluence des sols: en pays froid, la tranche humide est celle du mollisol (sol dégelé) fluant sur le pergélisol (sol gelé en profondeur).

(d) La solifluxion est fréquente quand il y a pergélisol continu ou même discontinu, ou même un sol gelé printanier dont la surface supérieure, ou toit, constitue le plan incliné qui favorise la fluence de la tranche de sol dégelé, ou mollisol.

(e) La majorité des fragments rocheux (galets ou blocs) est allongée parallèlement à la plus grande pente d'un versant donné: de 67° à 95° , selon A. CAILLEUX (1954).

Observations antérieures

Avant de présenter les caractéristiques dimensionnelles de coulées de solifluxion observées au Nouveau-Québec et dans le Nord-Est de l'Arctique canadien, il convient de faire un tour d'horizon des principaux auteurs qui ont traité la question.

(a) Travaux de langue anglaise

Plusieurs ouvrages américains ou anglais l'abordent souvent assez succinctement, et, la plupart du temps, avec relativement peu de données statistiques à l'appui.

A. K. LOBECK (1939), dans son traité de Géomorphologie, ne consacre qu'une demi-page à la solifluxion: il cite quelques exemples régionaux, mais ne présente, en tableaux ou dans le texte, aucune donnée numérique, ni sur la pente des coulées de solifluxion, ni sur la disposition des fragments au sein de ces coulées.

Il en est ainsi dans l'ouvrage de William D. THORNBURY (1958). Celui-ci, à propos d'une mention des bandes de pierres (sols striés possibles) spécifie qu'on les observe sur des pentes de 5 à 30° sex. Il consacre, en outre, un passage aux éboulis rocheux, mais sans donner de valeurs numériques, non plus qu'au sujet de l'inclinaison des pentes et au sujet de la disposition des galets et des blocs sur les pentes.

Le traité de Parker D. TRASK (1950) sur la sédimentologie appliquée, comporte quelques passages sur la solifluxion et sur divers types d'éboulis rocheux, mais, encore ici, sans expression de valeurs numériques quant aux pentes et à la disposition des fragments sur celles-ci; la diagnose de ces dépôts de pente n'est, en outre, pas établie de façon détaillée. Un des bons ouvrages de langue anglaise sur la Géomorphologie glaciaire et péri-glaciaire par Clifford EMBLETON et Cushlaine A. M. KING (1968), souligne rapidement, en une ligne, au sujet des coulées de solifluxion, que „le plus grand axe des pierres se trouve dans le sens du mouvement” (de la coulée). Cette observation n'est malheureusement fondée, dans le texte, au moins, sur aucune donnée numérique.

En ce qui concerne les éboulis ordonnés ou grèzes litées, qui sont une forme un peu apparentée à la solifluxion, les auteurs rapportent quelques données sur l'inclinaison des pentes sur lesquelles on les observe soit: 27°, au Pays de Galles, selon E. WATSON; 30 à 35°, en Nouvelle-Zélande, selon J. M. SOONS et Jean TRICART.

Mentionnons, enfin, pour mémoire, que le volume de W. C. KRUMBEIN et L. L. SLOSS (1958), qui, pourtant est consacré à la stratigraphie et à la sédimentation, ne comporte aucune mention, ni sur la solifluxion, ni sur les éboulis de gravité. Il en est de même pour l'ouvrage de Robert R. SHROCK (1948) qui traite des formations sédimentaires.

Il est, au total, assez étrange que ce soit un des traités les moins récents,

celui de Richard Foster FLINT (1957) qui présente le plus de données numériques sur la solifluxion et sur des phénomènes apparentés. Voici les paragraphes essentiels qui en traitent:

La solifluxion: „Les dépôts de solifluxion, (aussi appelés manteaux de solifluxion, coulées de terre et head) se produisent sur des pentes aussi faibles que 2°” (p. 198).

Glaciers rocheux: “De leur terme aval jusqu'en amont, leur surface est irrégulière et leurs pentes comprises entre 5° et 20°”.

Coulées de blocs: „La stabilité existe sur des pentes aussi prononcées que 17°, en Allemagne centrale”.

Un excellent travail de D. N. MOTTERSHEAD (1976) sur des aspects quantitatifs des formations de pente périglaciaire (et notamment les dépôts de solifluxion) dans le Sud-Ouest de l'Angleterre, apporte une série de données statistiques extrêmement précieuses concernant la composition granulométrique, des dépôts et leur indice d'hétérométrie, la disposition des fragments rocheux par rapport à l'azimut de la pente, la teneur en eau, des dépôts (paramètre très rarement mesuré), l'indice de plasticité, l'indice d'émoussé de M. C. POWERS, la variabilité des caractéristiques sédimentaires.

Il ressort de ce travail que pour 36 coupes étudiées, aucun des fragments ne présenterait leur grand axe avec un écart supérieur à 40° par rapport à l'azimut de la pente; cela voudrait dire une disposition à 100 % parallèle à la pente: ce serait la valeur la plus élevée du Globe pour une série aussi importante d'observations. Cette étude quantitative est incontestablement une des meilleures et une des plus complètes qui existe sur les pentes livrées à des actions périglaciaires; signalons également l'originalité, la précision et l'efficacité et sur le terrain et en laboratoire des méthodes employées.

Bien que les auteurs de langue anglaise, jusque vers 1975 n'aient pas étayé par beaucoup de données numériques leurs descriptions et interprétation de dépôts de solifluxion d'éboulis et de coulées de blocs, une étude comme celle de D. N. MOTTERSHEAD permet d'augurer et d'espérer que plusieurs des futurs travaux de langue anglaise seront à base statistique.

(b) Travaux de langue allemande

Deux grands ouvrages de langue allemande ont été consultés. D'une part, le manuel de Glaciologie du Professeur R. V. KLEBELSBERG (1948): cet ouvrage en deux tomes est essentiellement consacré à la Glaciologie et aux phénomènes glaciaires. L'auteur a consacré trois pages et demie aux phénomènes apparentés au Périglaciaire (solifluxion, sols polygonaux, etc). Des considérations générales, assez élaborées, sont présentées sur le mécanisme formation de ces phénomènes, y compris la solifluxion, mais à l'exclusion de toute donnée numérique sur l'orientation des galets sur les pentes, comme sur la valeur de celles-ci.

D'autre part, le traité en deux volumes du Professeur Paul WOLDSTEDT (1954), qui traite de la Géologie du Quaternaire, appelle un commentaire analogue: en effet, la solifluxion est décrite sans donnée numérique, en une page, et son rôle est mentionné, sans précision statistique dans quelques autres pages. L'ouvrage du même auteur, sur l'Allemagne du Nord à l'époque des glaciations (WOLDSTEDT, 1955), n'aborde pas la question de la solifluxion. Ajoutons, toutefois, que deux études, la première portant sur les glaciations dans le Harz, par Hans POSER et Jürgens HÖVERMANN (1951) et la seconde traitant des formes glaciaires dans le massif du Meissner, par Hans POSER et Michel BROCHU (1954), apportent les valeurs numériques suivantes, au sujet de la disposition des fragments parallèles à la pente, dans les formations solifluées: soit 68 % pour le Harz et 70 % pour le Meissner.

(c) Auteurs de l'Europe de l'Est

L'examen des sources accessibles, notamment la belle bibliographie de Yu. V. MUDROV (1969), qui couvre la période de 1690 à 1966 et comprend 36 titres, de même que la consultation attentive de la collection complète du *Bulletyn Peryglacjalny* (nos 1 à 25, particulièrement les nos 23 et 24), montre que les auteurs de l'Europe de l'Est ont tout naturellement concentré leurs recherches sur des phénomènes et sur des formations prédominants dans leur régions (loess, sols polygonaux, fentes en coin et systématique du périglaciaire): de ce fait, les études sur la solifluxion sont relativement rares et, quand elles existent, elles manquent souvent de données de statistiques de base: ainsi, c'est uniquement dans le travail de Tadeusz KLATKA (1961), portant sur la solifluxion fossile, que j'ai trouvé des mesures d'orientation de fragments sur les pentes.

Cette rareté en données quantitatives concernant les dépôts de solifluxion est un phénomène assez généralisé, à une échelle plus vaste, ce qu'illustre bien le no 18 du *Bulletyn Peryglacjalny*, dans lequel sont présentées les communications du Symposium conjoint de la Commission de morphologie périglaciaire et de la Commission sur l'évolution des versants de l'Union Géographique Universelle: parmi les 14 articles sur les versants périglaciaires, seul le travail d'Edward WATSON (1969) présente, pour le pays de Galles, des mesures statistiques concernant la disposition des fragments sur les pentes et d'autres paramètres.

(d) Travaux de langue française

Nous nous sommes arrêtés à quelques traités, dont celui de Louis LLIBOUTRY (1965) sur la Glaciologie, celui d'André CAILLEUX et de Gérald TAYLOR (1954), sur la Cryopédologie et celui de Max DERRUAU (1967), sur la Géomorphologie.

Le traité en deux volumes de Louis LLIBOUTRY (1965) consacre une page à la solifluxion: quelques cas régionaux de solifluxion sont cités.

On y trouve quelques statistiques sur la vitesse d'écoulement des masses solifluées, et sur les pentes (3 à 5°), et aussi des données sur la disposition des fragments, qui sont tirées de A. CAILLEUX et de G. TAYLOR (1954).

Le manuel de Cryopédologie de A. CAILLEUX et de G. TAYLOR (1954) présente une description et une interprétation génétique de tous les phénomènes périglaciaires connus à l'époque et, notamment, de ceux qui sont reliés à la solifluxion, à ses manifestations et aux phénomènes qui lui sont apparentés.

Voici, tout d'abord, les données fondamentales présentées dans ce manuel et portant sur les valeurs de pente pour diverses formations, exprimées en degrés sexagésimaux:

Sols polygonaux	0 à 2,5°
Polygones étirés	2,5 à 7,5°
Coulées de blocailles	3 à 24°
Sols striés	7,5 à 26°
Eboulis de gravité	27 à 39°
Front de glacier rocheux	3 à 47°

Une seconde série de données, d'importance absolument fondamentale, est présentée dans A. CAILLEUX (1969) et dans A. CAILLEUX et G. TAYLOR (1954): il s'agit de la disposition des fragments rocheux par rapport à la pente. Une donnée complémentaire est ajoutée: le pourcentage de blocs relevant du nez; on appelle, ainsi, les blocs dont le grand axe est plus incliné que la plus grande pente du terrain.

	Fragments parallèles à la pente en %	Blocs relevant du nez en %
A. CAILLEUX et G. TAYLOR (1954):		
Solifluxion en général	63 à 95	—
Dépôts fluviatiles	25 à 45	—
A. CAILLEUX (1969):		
Eboulis de gravité	67 à 77	30 — 35
Coulées de blocailles	67 à 95	69 — 90
Dépôts fluviatiles	25 à 32	69 — 90
Dépôts torrentiels	50 à 54	42 — 45

MAX DERRUAU (1967), dans son *Précis de Géomorphologie*, consacre un chapitre entier au système d'érosion périglaciaire, dans lequel il traite naturellement de solifluxion, avec quelques données numériques à l'appui. L'auteur reconnaît une importance capitale à la solifluxion: „Là où l'érosion éolienne n'enlève pas les sédiments fins, l'agent le plus important du modelé de printemps est la solifluxion ou congélifluxion. Ce terme recouvre deux réalités différentes: creeping accéléré de tout le manteau, au dégel (quelques millimètres par an), formation de quelques coulées boueuses localisées”.

Voici la valeur des pentes que présente Max DERRUAU pour les différents types de dépôts de pente périglaciaires, dont les grèzes litées qui sont partiellement solifluées, et les coulées boueuses qui le sont essentiellement. On remarquera que les inclinaisons de pente présentées par l'auteur pour les différents phénomènes sont, à la fois, plus faibles et moins étalées que les valeurs proposées par André CAILLEUX et par Louis LLIBOUTREY. (Voir ci-dessus):

1° Eboulis rocheux	30 à 35°
2° Grèzes litées ou éboulis ordonnés	pente inférieure aux éboulis ordonnés
3° Les coulées de blocs	5 à 6°
4° Glaciers rocheux	pente non précisée
5° Sols striés	4° et plus

Max DERRUAU termine son chapitre sur une remarque qui place la solifluxion en évidence „Le système périglaciaire présente une incontestable unité caractérisée par l'action du gel et par la solifluxion”.

Il ressort que les travaux de langue française sont, pour ce qui touche aux phénomènes glaciaires, relativement bien fournis en valeurs numériques et, de ce fait, offrent un fondament descriptif qui, d'un point de vue pratique, permet une bonne reconnaissance et identification de ceux-ci sur le terrain.

Observations de solifluxion vive dans l'Est de l'Arctique nord-Américain et comparaison avec des dépôts de solifluxion fossile

L'extension en latitude de nos observations est comprise du 62°, au Nouveau-Québec, au 81° de latitude nord dans la région du lac Hanzen, (île d'Ellesmère), soit une tranche de 19° de latitude (Tableau I).

Au total, l'ensemble des observations se répartit comme suit, selon les séries de mesures effectuées: 3 au Nouveau-Québec, 3 sur l'île de Baffin, 14 sur l'île d'Ellesmère, dans la région du lac Hazen.

(a) Nouveau-Québec et Est de l'Arctique nord-américain

Les dépôts de solifluxion vive actuelle observés par moi, entre 1958 et 1962, présentent les caractères d'ensemble communs suivants, dans les régions mentionnées ci-haut, et d'après de nombreux échantillonnages de 25 fragments.

Milieu climatique et végétal. Tous les dépôts actifs ont été observés dans des régions à toundra, caractérisées par un recouvrement des pentes par un manteau, plus ou moins continu, de végétation herbacée, avec Mousses, Lichens et quelques autres plantes, de 0,10 à 0,30 m de hauteur.

Humidité. Toutes les pentes sur lesquelles ont été observées les coulées et les dépôts de solifluxion actuels sont gorgées d'eau, partout, au printemps, en raison de la fonte des neiges, au cœur de l'été, en raison des

Disposition des blocs dans les coulées de solifluxion vive, régions de toundra de l'Est de l'Amérique du Nord
(resultats exprimés en pourcentage)

	Parallèle			Perpendiculaire			Oblique			Verticale
	à plat	tranche	total	à plat	tranche	total	à plat	tranche	total	total
Sagloue (Nouveau-Québec)	70	10	80	5	0	5	15	0	15	0 100
	40	20	60	12	0	12	8	8	16	12 100
Anse Eric (Nouveau-Québec)	72	12	84	8	4	12	4	0	4	0 100
Pagnirtung (Ile de Baffin)	12	60	72	16	—	16	4	4	8	4 100
Cap Dyer (Ile de Baffin): Blocs	72	12	84	8	4	12	—	0	4	0 100
Galets	56	8	64	20	8	28	8	0	8	0 100
Ile d'Ellesmère, région du lac Hazen										
Proximité de la base scientifique	72	—	72	4	—	4	24	—	24	0 100
Ile Johns	72	—	72	8	—	8	20	—	20	0 100
Versant est de la vallée du glacier										
Henrietta-Nesmitt	44	—	44	16	—	16	40	—	40	0 100
Tiers inférieur de la vallée	52	—	52	32	4	36	12	—	12	0 100
Lac des Trois-Universités (versant orienté au S)	80	—	80	0	—	0	20	—	20	0 100
Lac des Trois-Universités (versants orientés au N)										

Michel Brochu

Médiannes de 5 séries de mesures	68	-	68	16	-	16	16	-	16	0	100
Zone terminale de glacier Henrietta-Nesmitt	80	-	80	12	-	12	0	0	0	8	100
Versant est du lac Salor	60	-	60	28	-	28	12	-	12		100
Vallée de la rivière Blister Hill:											
Aval {bas de versant haut de versant	60	-	60	32	-	32	8	-	8	0	100
	40	16	56	16	4	20	24	-	24	0	100
Amont de vallée: bas de versant	80	-	80	0	12	12	8	-	8	0	100
Mi-vallée: haut de versant	48	-	48	20	4	24	28	-	28		100
Médiane	60	12	72	12	4	16	13	0	13	0	
Minimum	40	8	44	0	0	0	0	0	0	0	
Maximum	80	60	84	32	12	36	28	8	28	12	

Disposition des fragments rocheux ...

brouillards et des pluies fréquents, (cap dyer et Pagnirtung, île de Baffin) et au début de l'automne (à Saglouc, au Nouveau-Québec) en raison des pluies également; il persiste, en outre, partout, une humidité constante à la limite du mollisol et du pergélisol.

Pentes. Les pentes sur lesquelles a été observée la solifluxion sont comprises entre 7 et 25°.

On se souviendra, cependant, que d'après certains Auteurs, les coulées de solifluxion peuvent s'observer sur des pentes aussi faibles que 2 à 3°.

Disposition des blocs sur les pentes. Le tableau I nous apporte une confirmation très claire des valeurs apportées par les Auteurs cités plus haut, et selon lesquels il y aurait de 63 à 95 % de fragments disposés parallèlement à la pente (médiane 79%): en effet, la médiane des mesures effectuées par nous, au Nouveau-Québec et dans l'Est de l'Arctique canadien, donne 72 %, avec un maximum de 84 % et un minimum de 44 %.

Cependant, pour pouvoir comparer adéquatement avec les valeurs trouvées par A. CAILLEUX et G. TAYLOR, lesquels comptent, comme parallèles à la pente, tous les fragments obliques faisant, avec l'azimuth de la plus grande pente, un angle de 0 à 45°, vers la droite ou vers la gauche, il faudrait ajouter environ la moitié du pourcentage médian de fragments, que, sur le terrain, nous avons comptés comme obliques, soit, 7,5%: ce qui donne 72 + 7,5 soit 79,5 (max: 84 %, min. 44 %).

Cette médiane corrigée est donc égale à la valeur médiane des observations de A. CAILLEUX, et de G. TAYLOR, soit 79 % (max.: 95 %, min. 63 %).

L'examen du tableau I montre qu'il y a, quelquefois, à l'intérieur de chaque classe de disposition des galets, un certain pourcentage de fragments disposés sur la tranche: soit 12 % sur 72 % de fragments parallèles; 4 % sur 16 % de fragments perpendiculaires et 0 % sur 13 % de fragments obliques. Pour diverses raisons (temps principalement), cet aspect n'a pas été étudié pour toutes les formations. Les données numériques recueillies montrent que la disposition des fragments au sein d'une coulée de solifluxion, de façon généralement parallèle à la pente, est l'élément essentiel à une bonne diagnose de ce phénomène.

(b) Comparaison avec d'autres régions du Globe

Il existe, dans la péninsule de Gaspésie, des dépôts de solifluxion, aujourd'hui situés sous couvert forestier, que l'on peut caractériser comme fossiles, du fait de leur stabilité, acquise par l'implantation forestière d'une végétation forestière: nous avons examiné six de ces formations sur le versant nord de cette péninsule et deux sur le versant sud (Michel BROCHU, 1972).

Ces dépôts présentent plusieurs des caractères des formations de pente solifluées: matrice argileuse ayant permis la fluence, hétérogénéité du matériel, galets et blocs orientés en majorité parallèlement à la pente.

Les valeurs obtenues concernant ce dernier point concordent bien avec la médiane de 79 % trouvée pour le Nouveau-Québec et l'Est de l'Arctique canadien: soit une médiane générale (corrigée) de 86 % de fragments parallèles à la pente, avec un minimum de 72 et un maximum de 92 % (Tableau II).

Tableau II

Disposition des galets par rapport à la pente dans les dépôts de solifluxion active et fossile (mesures exprimées en %)

Région	Parallèle	Perpendiculaire
A. Solifluxion active		
Arctique nord-américain (toutes mesures M. BROCHU)	79,5	20,5
Régions périglaciaires européennes (A. CAILLEUX)	79	21
Médiane d'ensemble pour la solifluxion active	79,25	20,75
B. Solifluxion fossile		
Côte de l'Adriatique, Yougoslavie (M. BROCHU et J. TRICART, 1954)	75	25
Monténégro, vallée de la Lim (M. BROCHU, 1974)	87	13
Massif du Meissner, Allemagne (M. BROCHU et H. POSER, 1954)	70	30
Massif du Harz, Allemagne (J. HÖVERMANN et H. POSER, 1951)	68	32
Sud-ouest de l'Angleterre (D. N. MOTTERSHEAD, 1976)	100	0
Carpates polonaises (T. KŁATKA, 1961)	68,8	
Chili: Serra de Atacama (M. BROCHU <i>et al.</i> , 1975)	86	14
Chili: Andes de Santiago (M. BROCHU, 1974)	74	26
Gaspésie (M. BROCHU, 1972)	86	14
Médiane d'ensemble pour la solifluxion fossile	75	25

Cela démontre une chose, essentiellement: c'est que les coulées ou dépôts de solifluxion de Gaspésie, aux époques où y régnait des conditions climatiques, botaniques, et cryopédologiques de type périglaciaire présentaient des caractéristiques analogues aux formations de ce type que l'on trouve, actuellement, dans les régions arctiques et subarctiques du Globe.

D'autres mesures de dépôts de solifluxion fossile ont été effectuées en Yougoslavie et donnent, pour la région de Makarska, sur la côte Adriatique plus de 75 % de fragments parallèles à la pente (Michel BROCHU et Jean TRICART, 1954) et 87 %, dans la vallée de la Lim, aux environs de Bijelo Polje, au Monténégro (M. BROCHU, 1974, observations inédites); des valeurs analogues, ont été trouvées au Chili (M. BROCHU, 1974, observations inédites) pour les Andes de la région de Santiago (74 %) et 86 % pour la serra de Atacama (M. BROCHU, V. CONSTANZO et J. OVALLE, 1975).

Ajoutons une autre valeur de solifluxion fossile présentée par T. KLATKA (1961) pour des champs de pierre sur versants, soit 68,8 % de blocs parallèles à la pente, dans les Carpathes polonaises.

Entre la solifluxion active (méd. 79 %) et la solifluxion fossile (méd. 81 %) on remarque une évidente convergence de valeurs très élevées de fragments rocheux parallèles à la pente, la médiane des 2 types de solifluxion étant 80 %, soit un très faible écart entre la médiane de synthèse de mes observations dans l'Arctique (79,5 %) et, de la médiane centrale (79 %) proposée par A. CAILLEUX (1954).

Le fait que plusieurs formations de solifluxion fossile ont des médianes plus élevées (86 % en Gaspésie, 87 % au Monténégro et 80 % au Chili) peut tenir, d'une part, à une meilleure fluence de la matrice, ce qui permet aux blocs ou galets de mieux se mettre en place selon leur grand axe par rapport à l'inclinaison de la pente; d'autre part, comme corollaire, on peut, sous toute réserve, estimer que plus un dépôt de solifluxion a été actif longtemps, plus fort est le pourcentage de galets et de blocs qui ont pu se disposer parallèlement à la pente.

Ainsi, des formations solifluées à très fort pourcentage de fragments parallèles à la pente pourraient être des dépôts très évolués dont la matrice a pu être particulièrement fluide.

Précisons, enfin, les valeurs obtenues par quelques Auteurs pour des champs de pierres aux coulées pierreuses apparentées à des glaciers rocheux : A. PISSART (1953), dans les Hautes Fagnes, T. KLATKA (1961), dans les Carpathes polonaises et G. SCHWEITZER, dans les Alpes autrichiennes, avec respectivement 58, 68,8 et 65 % de fragments parallèles à la pente, soit une médiane de 65 %.

LES ÉBOULIS DE GRAVITÉ

Pour établir un diagnostic de solifluxion, avec le plus haut degré possible de certitude, il est indispensable de comparer avec les éboulis de gravité, que l'on trouve sur des pentes de 27 à 39 %; les échantillonnages ont été établis à partir de comptages de 25 cailloux.

Louis LLIBOUTRY (1965) rapporte, en les endossant, les valeurs présentées par André CAILLEUX pour les éboulis de gravité: 67 à 77 % de fragments parallèles aux pentes, lesquelles sont légèrement inférieures aux

valeurs données par les mêmes auteurs pour les coulées de solifluxion: 63 à 95 % (médiane 79 %), avec la division en secteurs de 45°.

Les six observations effectuées au Nouveau-Québec et dans l'Est de l'Arctique nord-américain du Sud de l'île de Baffin au Nord de l'île d'Ellesmère (Tableau III) et qui concernent les éboulis de gélivation et de gravité caractérisés, présentent une médiane de 40 % de fragments de parallèles francs; la médiane corrigée, selon la méthode indiquée plus haut, ne s'élève qu'à 51 %; des mesures ultérieures permettront de mieux préciser le pourcentage des fragments parallèles à la pente des éboulis de gélivation et de gravité.

Tableau III
Disposition des blocs dans les éboulis de gravité

	Parallèles			Perpendiculaires			Obliques		
	à plat	sur tranche	total	à plat	sur tranche	total	à plat	sur tranche	total
Arctique Nord-Américain									
Lake Harbour (100 m E poste police)	36	—	36	48	—	48	16	—	16
Île Cornwallis	40	—	40	44	—	44	16	—	16
Ivujivik (Nouveau-Québec)	40	—	40	28	—	28	24	4	28
Île d'Ellesmère (région du lac Hazen)									
Glacier Honfleur versants raides (1) dont 4 % de relevés (2) dont 16 de relévés	36	—	36 (1)	44 (2)	—	44	20	—	20
Vallée Riv. Blister									
Haut de pente	48	—	48	20	4	24	28	0	28
Hill, Bas de pente	40	16	56	16	4	20	24	0	24
Médiane			40			38			22
Minimum			36			20			16
Maximum			56			48			28
Données comparatives, Chili									
Andes de San-tiago (1450 m)	52	—	52	44	—	44	4	—	4
Moyenne Chili	48	—	48	44	—	44	8	—	8
			50			44			6

Ont été respectivement comptés comme parallèles, obliques et perpendiculaires les blocs dont la plus grande longueur fait avec la direction de la plus grande pente, dans le plan de l'éboulement, un angle de moins de 30°, de 30° à 60° et de plus de 60°.

Deux séries de mesures effectuées dans les Andes de Santiago, à 1450 m d'altitude, sur de beaux éboulis de pente apportent des données très voisines de celles qui ont été trouvées pour l'Arctique nord américain: soit les moyennes corrigées de 53 % de fragments parallèles à la pente et 47 % de fragments perpendiculaires. Une chose est certaine, c'est que, dans un éboulement de gravité, les fragments parallèles à la pente diminuent nettement, par rapport aux dépôts de solifluxion, corrélativement à une augmentation du nombre de fragments perpendiculaires et obliques: c'est le point essentiel et nos observations concordent bien avec celles des autres Auteurs, à cet égard.

Les éboulis de gravité des régions étudiées ont, au total, près des parois et ou des versants rocheux, qui leur donnent naissance par les éléments qui s'en détachent, des fragments dont la disposition tient plus du hasard que d'une mise en place organisée.

Mais comme on peut le constater, sur les pentes de la vallée de la rivière Blister Hill, dans la région nord du lac Hazen, à mesure que les fragments progressent vers le bas de la pente, grâce à des mouvements de solifluxion, favorisés par une matrice de plus en plus abondante, le nombre d'éléments parallèles à la pente s'accroît de façon importante, et conformément aux lois propres aux coulées de solifluxion.

LES DÉPÔTS FLUVIATILES OU FLUVIOGLACIAIRES

Le tableau IV montre, pour les trois dépôts fluviatiles analysés une caractéristique bien nette: une majorité de fragments de ces dépôts a une disposition perpendiculaire à la pente ou à l'axe du cours d'eau considéré, soit 67 % (médiane corrigée). Il s'agit d'une disposition qui est à l'inverse de la disposition des blocs dans une coulée de solifluxion, où la majorité (79 %) des éléments est, au contraire, parallèle à la pente.

La distinction entre les coulées de solifluxion, quelques formes de détail ou de modélisé qu'elles puissent par ailleurs présenter, les éboulis de gravité et les formations meubles d'origine fluviatile peut donc être établie statistiquement de façon cohérente et régulière.

Les formations analysées pour le Nouveau-Québec et pour l'Est de l'Arctique canadien (échantillonnages de 25 fragments) apportent, en les précisant, des valeurs complémentaires nouvelles aux quelques données existant déjà, d'une part, pour ces régions où elles n'avaient pas été calculées ou établies statistiquement; d'autre part, cette seconde série de valeurs complète et précise, aussi, les premières statistiques qui avaient été dégagées à l'échelle mondiale.

Une observation peu usuelle, mais qui peut être utile, a été apportée dans ce travail: il s'agit du pourcentage de fragments obliques à la pente.

LES APPLICATIONS AUX SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

Tout projet de construction, même d'importance secondaire, à être exécuté sur une pente, dans les régions arctiques et subarctiques doit faire l'objet d'une attention très spéciale. Cette étude, porte, on l'a vu, sur le Nouveau-Québec et sur l'Est de l'Arctique canadien, où les ingénieurs exercent leur activité de façon de plus en plus intense depuis la Seconde Grande Guerre et où des phénomènes, comme la solifluxion et les crues printanières, ont causé des milliers de dollars de dégâts dans les localités du détroit d'Hudson et ailleurs. Elle montre que, d'un point de vue pratique, les ingénieurs et les conducteurs de travaux peuvent, rapidement et avec un bon coefficient de sécurité, déceler à quel grand type de formation et de phénomène périglaciaire ils ont affaire, en effectuant des séries de mesures simples sur la disposition des galets et des blocs sur les pentes.

On doit retenir que, même en dehors du lit majeur d'une rivière, une majorité de fragments perpendiculaires à la pente est l'indice d'une mise en place fluviatile. Si, de plus, les galets et les blocs ne sont pas couverts de Lichens, il peut s'agir d'un site, qui, même s'il est parfaitement sec, au coeur de l'été, peut être envahi par les crues printanières, subites et dévastatrices, de la rivière voisine.

Il faut également garder en mémoire qu'une nette majorité de fragments disposés parallèlement sur une pente est un indice certain de solifluxion et la présence active de ce phénomène doit inciter à la plus grande prudence, dans l'établissement des projets de construction. Les seules régions à dépôts soliflués ne présentant pas de danger sont des régions à couvert forestier dense, où la solifluxion est, par conséquent, stabilisée et à l'état fossile, comme c'est le cas en Gaspésie. Les tableaux présentés dans le corps de l'article et le tableau IV de synthèse serviront de guide pour le détail des valeurs numériques afférentes à chaque phénomène. Il va de soi que, dès qu'un terrain suspect ou dangereux a été repéré, il convient de l'éliminer, si possible comme site de construction, la solution de sécurité maximale étant, naturellement, d'ancrer toute construction, dans les régions arctiques ou subarctiques, sur un affleurement de substratum rocheux s'il en existe.

Bibliographie

- BERTOUILLE, Horace, 1969 — Quaternaire de l'Artois (France). *Biuletyn Peryglacjalny*, n° 19; p. 5 — 85, 24 fig., 3 tabl., 1 carte h-t.
Biuletyn Peryglacjalny (1969) n° 18, présentant les communications du Symposium Conjoint de la Commission de morphologie périglaciaire et de la Commission sur l'évolution des versants de l'Union Géographique Internationale.
- BROCHU, Michel, 1957 — Lacs de fonte de culot de glace dans les Appalaches. *C.R. Ac. Sc.*, t. 244; p. 2638 — 2639, 1 tabl. Paris.

- BROCHU, Michel, 1972 — Premières observations de dépôts de solifluxion fossiles en Gaspésie. *Biuletyn Peryglacjalny*, no 21; p. 15—20, 1 tabl.
- BROCHU, Michel, OVALLE, José, et CONSTANZO, Victor, 1974 — Observaciones de solifluxión fossil en el límite de las provincias de Atacama y Coquimbo, Chile. *Revista Geographica de Valparaíso*, vol. V, no. 1—2; p. 8—10. Valparaíso.
- BROCHU, Michel et POSER, Hans, 1954 — Zur Frage des Vorkommens pleistozäner Glazialformen am Meissner. *Abhandlungen des Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft*, Bd. 6; p. 113—125, 1 fig.
- BROCHU, Michel et TRICART, Jean, 1955 — Sur quelques dépôts quaternaires de climat froid sur les rives de l'Adriatique, *C.R. somm. Soc. Géol Fr.*, vol. 13; p. 253—255.
- CAILLEUX, André, 1967 — La Géologie. Coll. „Que sais-je?”, no 525; Paris.
- CAILLEUX, André et TAYLOR, Gérald, 1954 — Cryopédologie. Etude des sols gelés. Expéditions Polaires Françaises; 218 p., 115 fig. Hermann et Cie éd., Paris.
- DERRUAU, Max, 1967 — Traité sur la Géomorphologie. Masson et Cie éd.; 416 p., 162 fig., 61 pl., Paris.
- EMBLETON, Clifford et KING, Cuthlaine A. M. 1968 — Glacial and Periglacial Geomorphology. 608 p., 105 fig., 30 pl, 19 tabl. St-Martins Press, New-York.
- FLINT, Richard Foster, 1957 — Glacial and Pleistocene Geology. 553 p., 136 fig., 5 pl, 53 tabl. John Wiley and Sons, New-York.
- KŁATKA, Tadeusz, 1961 — Indice de structures et de texture des champs de pierre de Łysogóry. *Bulletin de la Société des Sciences et des Lettres de Łódź*, vol. XII, no 10; 21 p., 3 fig., 4 photos, Łódź.
- KLEBELSBERG, R. V., 1948 — Handbuch des Gletscherkunde und Glazialgeologie. 1028 p., 93 fig., 24 tabl. Springer Verlag, Vienne.
- KRUMBEIN, W. C., et SLOSS, L. L., 1958 — Stratigraphy and Sedimentation. 497 p., 112 fig., 42 tabl., W. H. Freeman and Company, New York et Londres.
- LLIBOUTRY, Louis, 1965 — Traité de Glaciologie. 1039 p., 200 fig., 88 pl. Masson et Cie éd., Paris.
- LOBECK, A. K., 1939 — Geomorphology. 731 p., McGraw Hill Book Company, New York et Londres.
- MOTTERSHEAD, D. N., 1976 — Quantitative aspects of periglacial slope deposits in Southwest England. *Biuletyn Peryglacjalny*, no 25; p. 35—57, 13 fig., 5 tabl.
- MUDROV, Yu. V., 1969 — Bibliography of papers on periglacial morphology published by some writers in 1960-1966. *Biuletyn Peryglacjalny*, no 19; p. 423—496.
- POSER, Hans et HÖVERMANN, Jürgen, 1951 — Untersuchungen zur Pleistozänen Harz-Vergletscherung. *Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft*, Bd. 3, no 15; p. 61—115.
- PISSART, A., 1963 — Des replats de cryoturbation au Pays de Galles: une variété géante de sol en guirlandes. *Biuletyn Peryglacjalny*, no 12; p. 119—135, 6 fig., 3 pl.
- RUDBERG, S., 1962 — A report of some field observations concerning periglacial geomorphology and mass movement on slopes in Sweden. *Biuletyn Peryglacjalny*, no 11; p. 311—323, 3 fig., 3 tabl., 1 carte h-t., 1 pl.
- SHROCK, Robert R., 1948 — Sequence in layered rocks. 507 p., 397 fig. McGraw Hill Book Company, New York et Londres.

- THORNBURY, William D., 1958 — Principles of Geomorphology. 618 p., 248 fig., John Wiley and Sons, New York.
- TRASK, P. E., 1950 — Applied Sedimentation. 707 p., 110 fig., 20 tabl. John Wiley and Sons, New York.
- WATSON, Edward, 1969 — The slope deposits in the Nant Iago Valley near Cader Idris, Wales. *Biuletyn Peryglacjalny*, no 18; p. 95—113; 9 fig., 1 tabl., 7 pl.
- WOLDSTEDT, Paul, 1954 — Das Eiszeitalter, Grundlinien einer Geologie des Quartärs. 374 p., 134 fig., Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.