

BULLETIN N° 212 des Laboratoires de Géologie, Minéralogie, Géophysique
et du Musée géologique de l'Université de Lausanne.

Stries et lunules glaciaires à Saint-Triphon (Vallée du Rhône)

PAR

HENRI MASSON ET AYMON BAUD¹

Summary. — The quarries of Saint-Triphon show limestone surfaces polished by the würmian Rhône glacier. The following marks of glacial abrasion are observed: grooves of dm to m depth, for the origine of which a mechanism is proposed; striations; crescentic fractures and chattermarks, whose description is the main topic of this paper.

A chapter is devoted to more general considerations on the classification and interpretation of crescentic marks (= lunules). Three groups are distinguished on a purely morphological base:

(1) Crescentic gouges (= entailles lunulaires), generally concave upstream, exceptionally downstream; (2) crescentic fractures (= fissures lunulaires), always concave downstream; (3) chattermarks (= broutures, microlunules), concave downstream if concave. It is concluded, contrary to general opinion, that the concavity of lunules is a reliable criterion of the direction of glacial flow, particularly in the last two groups. The criterion of the dip of the fracture is disproved by our observations for the second group, but may be useful for the third. Thus the crescentic marks, once classified in the correct group, may afford very useful directional evidence on the glacial flow.

These criteria are used in an attempt to analyse the changing flow direction during the retreat of the glacier. A wall was first surmounted vertically, then later subhorizontally at 130° to the normal direction of glacial flow in the valley. At another locality the axes of the crescentic fractures are parallel to the valley, while the neighbouring striations are oblique and related to a later phase where the flow was more influenced by local relief. This increasing influence of small scale topography is supposed to correspond to a late phase of lower plasticity owing to reduced thickness of the ice.

INTRODUCTION

Les collines de Saint-Triphon s'élèvent dans la plaine alluviale du Rhône entre le lac Léman et le verrou de Saint-Maurice. Les calcaires triasiques qui les constituent sont exploités dans plusieurs carrières qui fournissent d'excellentes conditions d'observation géologique (BADOUX, 1962); deux sont actuellement en activité: celle du Lessus, à l'extrémité NW des collines, et celle des Andonces au SW.

¹ Institut et Musée de Géologie, Palais de Rumine, CH-1005 Lausanne (Suisse).

A l'occasion de recherches géologiques nouvelles (BAUD et MASSON, 1975), nous découvrîmes dans ces deux carrières un très beau plancher glaciaire, fraîchement dégagé par l'exploitation, et qui présentait, outre les polis et striations habituelles, d'autres figures d'érosion glaciaire moins communes. Sa description nous paraît justifiée par l'intérêt de ces figures, encore peu étudiées dans les Alpes, et par la rareté de tels affleurements dans les régions lémanique et préalpine, où le plancher glaciaire rhodanien, partout recouvert de moraine ou attaqué par l'érosion récente, n'est bien observable que dans des excavations artificielles temporaires (au moment où nous écrivons, une grande partie des surfaces étudiées est déjà détruite par la poursuite de l'exploitation).

Les marques laissées à Saint-Triphon par l'érosion glaciaire sont :

- à grande échelle (\sim m à \sim dam) : un relief de roches moutonnées ; généralement enterrées sous la moraine, leurs larges croupes arrondies et polies apparaissent sur la colline du Lessus ;
- à moyenne échelle (\sim dm à \sim m) : les cannelures ;
- à petite échelle ($\leq \sim$ dm) : diverses marques de friction glaciaire qui seront l'objet principal de cette étude : les stries, les lunules, et les « broutures » et « microlunules ».

Les sculptures glaciaires de Saint-Triphon doivent leur préservation remarquable à la protection de la couverture morainique. Les surfaces fraîchement dégagées peuvent être soit intactes, et couvertes de stries (mais sans lunule visible) ; soit affectées d'une légère corrosion qui ternit les polis, met en relief les grains dolomitiques et souligne les fractures : dans ce cas les stries sont plus ou moins effacées, mais les lunules ressortent à la perfection (Pl. I).

Là où la couverture morainique est absente depuis longtemps, l'action des eaux superficielles a détruit stries et lunules, même sur des surfaces dont les formes arrondies révèlent encore nettement l'origine glaciaire. La corrosion a même provoqué par endroits un début de lapiéage selon les directions des diaclases : c'est le premier stade du passage du relief glaciaire au relief karstique.

LES CANNELURES

Ce sont des sillons parallèles à la direction d'écoulement du glacier. Leur profondeur, habituellement de quelques dm, peut atteindre 180 cm. Leur section est arrondie, les plus profondes adoptant la forme en U. Leurs parois, aux angles émoussés, et parfois un peu surplombantes, sont polies et sculptées de nombreuses stries subhorizontales ou de lunules. Ce relief est typique de l'action d'un glacier sur des calcaires.

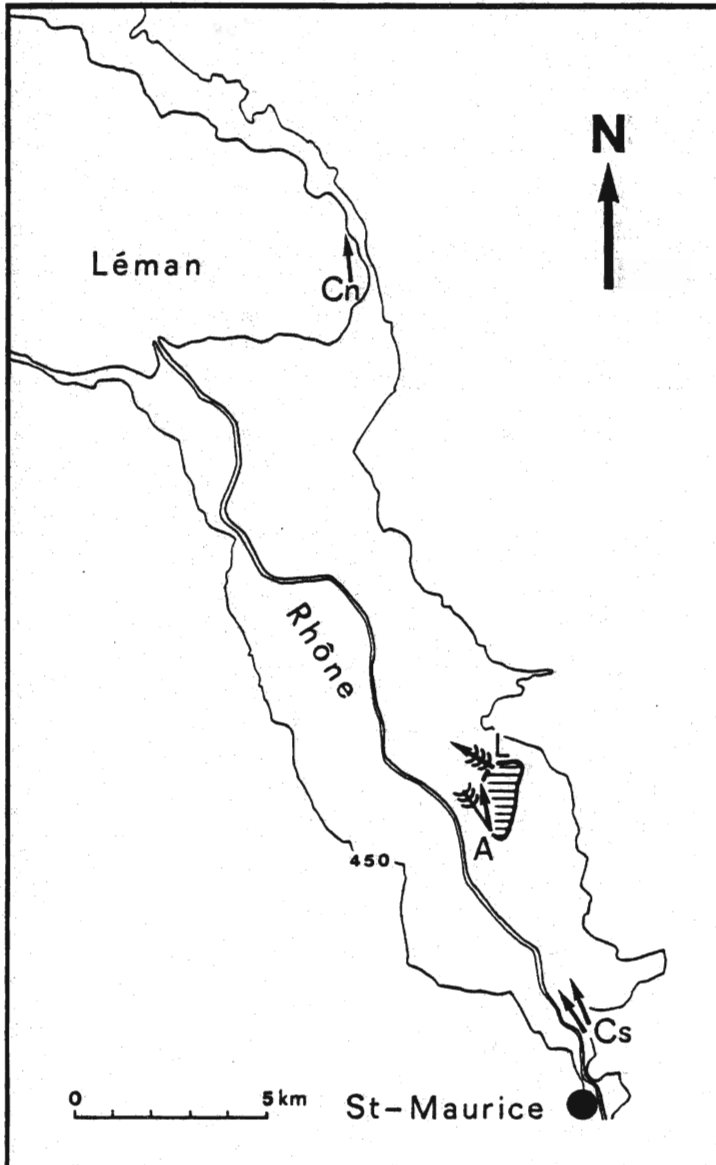


Fig. 1. — Carte de situation, avec les directions dominantes des stries (flèches) et des lunules (arcs). Hachures : collines de Saint-Triphon ; A : Andonces ; L : Lessus. Cn : Chillon (d'après Morlot, 1866). Cs : carrières de Chiètres. La cote 450 délimite approximativement la plaine alluviale.

L'origine des cannelures est, comme celle de beaucoup d'autres détails de la morphologie glaciaire, encore mal connue. On admet habituellement qu'elles proviennent de grosses stries creusées par des

blocs charriés à la base du glacier, ce qu'AGASSIZ (1847) appelait des « coups de gouge » ; mais il faut encore expliquer pourquoi l'abrasion agit préférentiellement dans ces cannelures naissantes et les élargit à la base en même temps qu'elle les approfondit.

On nous permettra de formuler une hypothèse nouvelle à ce sujet. Tout d'abord, la présence, sur leurs parois, de nombreuses stries parallèles ou de lunules montre que les cannelures ont été creusées par la glace chargée de débris, et non par l'eau comme on l'a parfois supposé ; il importe donc de bien distinguer ces cannelures des chenaux creusés par les torrents sous-glaciaires (de section triangulaire, cf. VIVIAN, 1970), et des lapiez engendrés par corrosion. Par ailleurs on sait depuis longtemps qu'un phénomène très important à la base des glaciers est la fonte sous pression de la glace contre les protubérances, et le regel concomitant de l'eau dans les dépressions en aval de celles-ci. La glace de regel est plus riche en fins débris rocheux que la glace normale du glacier (ce phénomène a été observé sur le vif dans un tunnel par KAMB et LA CHAPPELLE, 1964). Or il semble que les cannelures doivent précisément constituer des lieux de moindre pression favorables à la formation de glace de regel, donc à une concentration anormalement élevée de débris dans la glace, donc à une abrasion plus vigoureuse qu'ailleurs ; ce qui expliquerait leur approfondissement et leur élargissement.

LES STRIES

Les polis glaciaires de Saint-Triphon présentent des stries entrecroisées dans plusieurs directions. En chaque endroit ressort une direction dominante, à laquelle se superposent suivant une ou plusieurs directions bien distinctes d'autres stries généralement plus récentes : elles enregistrent des phases brèves et tardives de l'écoulement du glacier pendant son retrait. Dans quelques cas, il est possible que des stries obliques à la direction dominante représentent au contraire des vestiges d'une phase antérieure. Les relations chronologiques ne sont pas toujours faciles à établir. Nous tenterons plus loin d'interpréter les différentes directions d'écoulement observées à Saint-Triphon.

La particularité la plus remarquable des stries de Saint-Triphon est la présence fréquente des microstructures que nous décrirons plus loin sous les noms de broutures et microlunules. Nous montrerons que leur morphologie permet de reconnaître sans peine le sens du mouvement de la glace.

On rencontre çà et là de larges stries de direction aberrante, un peu incurvées. Leur origine n'est vraisemblablement pas glaciaire ; peut-être sont-elles dues à des icebergs (cf. CHAMBERLIN, 1885, p. 227-228).

LES LUNULES

a) Généralités

Ce sont des marques en forme de croissant de lune, en principe perpendiculaires aux stries, et dues comme ces dernières à la friction exercée par le glacier sur son lit. Bien connues en Scandinavie et en Amérique du Nord, elles n'ont été que rarement signalées dans les Alpes. On sait qu'il en existe plusieurs types différents, et que leur concavité peut être orientée soit vers l'amont, soit vers l'aval. D'excellentes études de ces marques glaciaires se trouvent dans les remarquables ouvrages de CHAMBERLIN (1888) en Amérique et de LJUNGNER (1930) en Suède. Depuis lors, HARRIS (1943) en a donné une classification généralement acceptée par les auteurs récents. Mais nous estimons sa nomenclature un peu trop chargée et hétéroclite ; surtout, nous ne partageons pas l'opinion de cet auteur sur l'usage de ces figures comme critère du sens du flux glaciaire. Nous proposerons plus loin une nomenclature plus compacte, qui nous paraît mieux adaptée à la reconstitution des mouvements des glaciers.

En 1957, WEGMANN et SCHAEER décrivirent dans le Jura des fractures d'aspect semblable mais d'origine tectonique, et introduisirent à cette occasion le mot *lunule*. Ce terme descriptif simple nous paraît très adéquat pour désigner l'ensemble des différents types de marques de friction arquées, qu'elles soient d'origine glaciaire ou tectonique. On pourra ensuite préciser, selon l'orientation de leur concavité par rapport au mouvement du glacier, si elles sont aval-concaves ou aval-convexes, ainsi que d'autres particularités : si elles sont isolées ou groupées en trains de lunules consécutives ; si ce sont des fissures simples ou des entailles laissées par l'arrachage d'un fragment de roche ; etc. Nous reprendrons ces problèmes de nomenclature après la description des figures observées à Saint-Triphon.

b) Les lunules de Saint-Triphon

Les lunules de Saint-Triphon sont toutes aval-concaves et toujours groupées en trains de plusieurs dizaines de lunules consécutives. Chaque lunule consiste en une fracture simple, sans entaille du plancher glaciaire ; le fin sillon, d'une profondeur de 1 à 2 mm, qui souligne les lunules à l'affleurement, n'est pas une entaille d'origine mécanique, mais provient de la corrosion de la fracture par la circulation d'eaux faiblement acides.

La forme des lunules est approximativement hyperbolique, avec une « charnière » où la courbure est maximale et des « flancs » presque droits. Beaucoup de lunules sont symétriques, d'autres ont un flanc plus

développé que l'autre ; parfois on n'observe qu'une portion de flanc. L'ouverture (angle entre les flancs) des lunules symétriques est assez constante dans un train donné ; elle vaut habituellement 125 à 130°, tombant plus rarement à 90 à 110°, et exceptionnellement à 65°. Les charnières d'un train de lunules ne sont généralement pas parfaitement alignées ; mais le plus souvent elles se groupent statistiquement de part et d'autre d'une droite subparallèle aux axes de symétrie des lunules individuelles.

Nos lunules correspondent à tous égards aux « crescentic fractures » d'Amérique (p. ex. CHAMBERLIN, 1888 ; LAHEE, 1912 ; HARRIS, 1943 ; DREIMANIS, 1953 ; FLINT, 1955 et 1971), et aux « Parabelrisse » de Suède (LJUNGNER, 1930) et d'Allemagne du Nord (Schulz, 1962 et 1967). Notons que la plupart des planchers glaciaires étudiés par ces auteurs sont en granite ou en gneiss ; cependant ce type de lunules fut déjà observé sur le calcaire par CHAMBERLIN, qui ajoute que ce n'est pas une roche favorable à leur développement. Ces marques ressemblent aussi beaucoup aux fractures tectoniques arquées pour lesquelles WEGMANN et SCHAEER (1957) introduisirent le mot lunule. A notre connaissance, ce type de lunules n'a pas encore été décrit dans les Alpes.

PLANCHE I

Fig. 1, 2 et 3. — Lunules glaciaires à la carrière des Andonces. Les flèches indiquent le sens du flux glaciaire.

Les marques rectilignes ne sont pas des stries, mais des diaclases. Une légère corrosion a marqué indifféremment les fractures d'origine glaciaire (lunules) et tectonique (diaclasses), mais effacé les stries. La marque située sous la flèche de la fig. 1 a une origine incertaine.

Fig. 4. — Petites lunules (soulignées à l'encre) sur le flanc d'une cannelure glaciaire à la carrière du Lessus.

PLANCHE II

Stries avec broutures à la carrière du Lessus. Les flèches indiquent le sens du flux glaciaire.

Fig. 1. — Noter les stries jeunes se superposant aux stries dominantes vers 302°.

Fig. 2. — Microlunules.

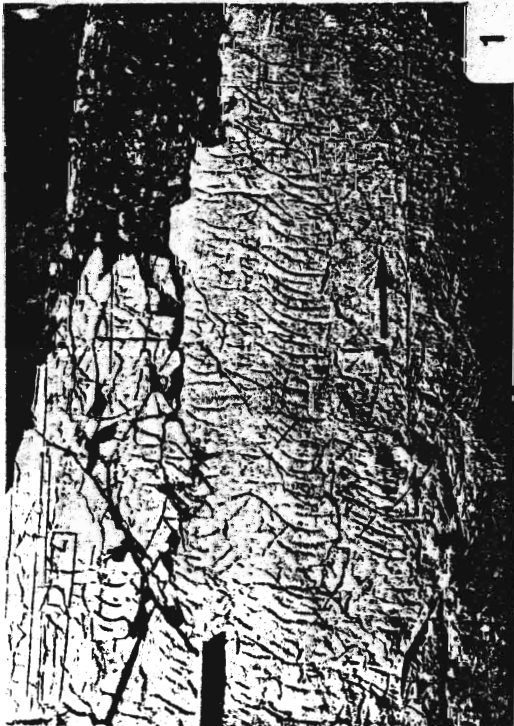
Fig. 3. — Broutures dans une strie verticale : leur concavité montre que le mouvement de la glace s'effectuait du bas vers le haut. On note quelques stries horizontales plus jeunes.



2



4



1



3

PLANCHE II

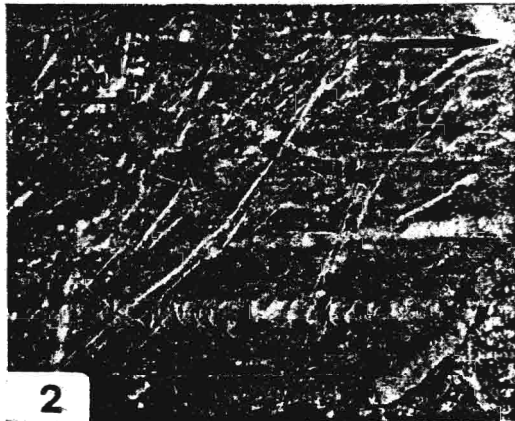
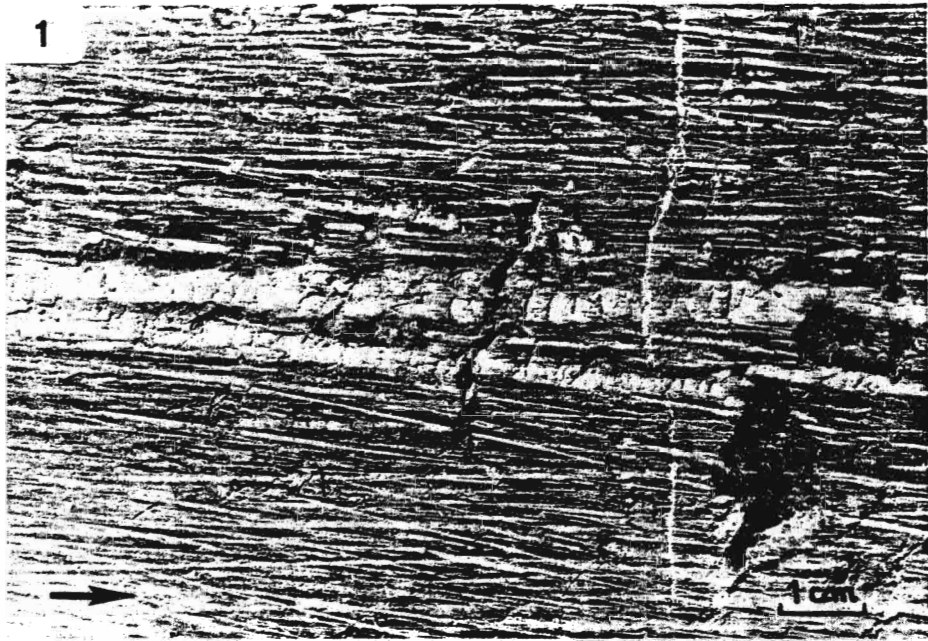


PLANCHE III

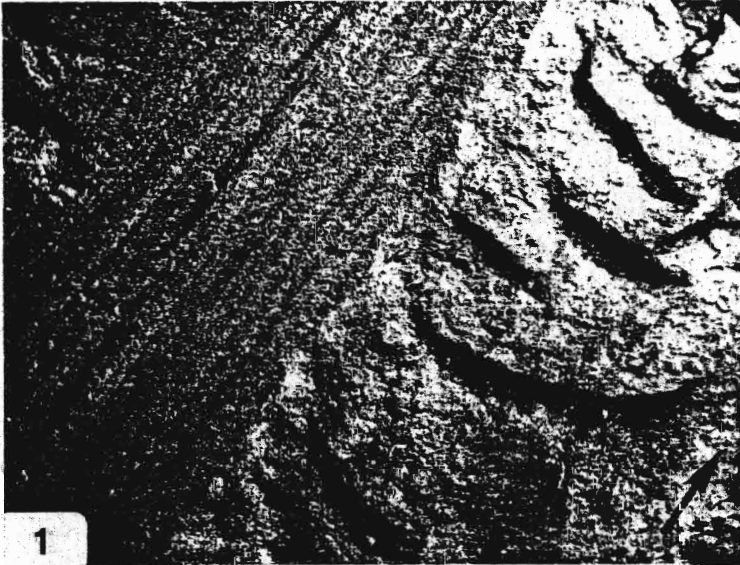


PLANCHE III

Stries avec broutures à la carrière du Lessus. Les flèches indiquent le sens du flux glaciaire. Noter l'asymétrie et la concavité des broutures, et l'existence de deux directions de stries légèrement obliques. Photos au microscope à balayage.

Fig. 1 : $\times 16$. Fig. 2 : $\times 32$.

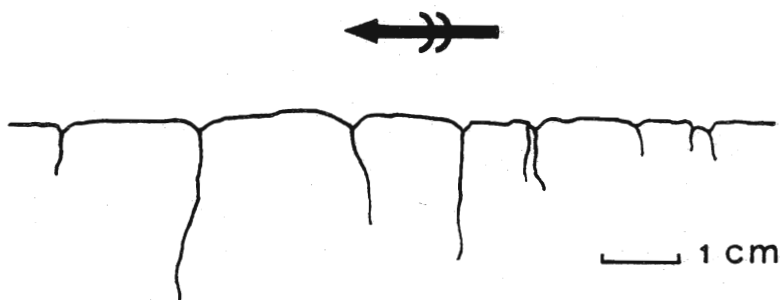


Fig. 2. — Coupe verticale d'un train de lunules, parallèlement à son axe. La flèche indique le sens du flux glaciaire.

La figure 2 montre une coupe typique dans nos lunules : on voit que le pendage des fractures est toujours raide, souvent un peu irrégulier et indifféremment vers l'aval ou vers l'amont. Ce résultat contredit l'affirmation de HARRIS (1943) que le pendage des lunules glaciaires est toujours aval. Cette affirmation, acceptée par OKKO (1950), fut déjà contestée par DREIMANIS (1953) et FLINT (1971).

c) *Relations avec les stries*

Les stries sont rares ou absentes sur les surfaces mêmes où les lunules abondent, et réciproquement. Déjà constaté ailleurs, ce fait a été jugé paradoxal si stries et lunules résultent toutes deux, comme on l'admet habituellement, de la friction de blocs sur le plancher glaciaire. A Saint-Triphon, ce phénomène paraît nettement lié à l'altération de la roche, comme nous l'avons déjà dit dans l'introduction : une légère corrosion efface les stries, mais fait ressortir les plus fines fractures, aussi bien celles d'origine glaciaire (lunules) que tectonique (diaclasses) (Pl. I).

A la carrière du Lessus, l'axe des trains de lunules est parallèle à la direction dominante des stries (300 à 305°). Aux Andonces, au contraire, on note une obliquité systématique de 15 à 20° entre les trains de lunules (320 à 335° ; moyenne de 21 mesures : 326°) et la direction dominante des stries sur les surfaces immédiatement voisines (338 à 350°) ! Cette constatation inattendue peut s'expliquer à la lumière des considérations précédentes, en admettant une succession de deux phases de flux glaciaire selon des directions différentes : en gravant dans la roche les nombreuses stries qui enregistrent son existence, la dernière phase a effacé les stries antérieures, mais pas les lunules qui sont des marques plus profondes. Aujourd'hui le plancher glaciaire, lorsqu'il est intact, ne montre que les stries de la dernière phase ; mais une légère corrosion, qui détruit ces stries, peut ressusciter le souvenir de la phase précédente en révélant les lunules ; enfin une altération plus poussée supprime stries et lunules, mais fait ressortir de plus en plus nettement les fractures tectoniques.

BROUTURES (« CHATTERMARKS ») ET MICROLUNULES
(Pl. II et III)

Il s'agit de marques que nous avons couramment observées à l'intérieur des stries, surtout dans les plus larges (≥ 1 mm).

Sous leur forme la plus fréquente, ce sont des entailles transversales, occupant toute la largeur de la strie, tantôt serrées les unes contre les autres, tantôt espacées. Généralement asymétriques, elles présentent alors une pente raide vers l'amont et plus douce vers l'aval (Pl. III). Elles sont souvent arquées, et dans ce cas toujours aval-concaves ; mais d'autres fois elles sont rectilignes ou irrégulières.

Ces sculptures sont identiques aux « chattermarks » des auteurs américains, ainsi nommées par analogie avec la vibration saccadée d'un instrument creusant un sillon (CHAMBERLIN, 1888 ; HARRIS, 1943 ; FLINT, 1971) ; soit, en français, marques de broutage, « broutures »¹. SCHULZ (1967) les décrit en Allemagne sous le nom de « Miniaturrisse ». Des marques semblables ont été signalées dans le Jura et sur le Plateau suisse par ROLLIER (1889, 1908), qui en donne une splendide illustration (1908) ; selon cet auteur, elles auraient été observées pour la première fois au glacier de Grindelwald par HAGENBACH-BISCHOFF, qui reconnut leur courbure aval-concave.

Un type particulier de broutures s'observe dans certaines stries : elles consistent en une fracture arquée, toujours aval-concave, sans entaille très marquée du fond de la strie (Pl. II, fig. 2). Elles ressemblent beaucoup aux lunules du chapitre précédent, dont elles diffèrent surtout par leur taille plus petite (généralement < 5 mm, mais parfois jusqu'à 12 mm), par leur localisation dans une strie, et par le fait que, relativement à leur taille, elles sont un peu plus espacées. Pour souligner cette ressemblance, nous avons trouvé commode de désigner ces marques, guère décrites jusqu'ici, du nom de « microlunules ». Elles passent graduellement aux broutures ordinaires au fur et à mesure que l'entaille se creuse et que la courbure de l'arc devient moins régulière (Pl. II, fig. 1 ; cf. CHAMBERLIN, 1888, fig. 31). Certaines de ces marques, dans des stries plates, semblent représenter des coupes horizontales (par abrasion) dans d'anciennes stries à broutures ordinaires, au niveau de la base des entailles ; ce qui montrerait que l'entaille se poursuit dans la roche par une fine fracture généralement arquée (contrairement aux affirmations de HARRIS, 1943 ; OKKO, 1950 ; et FLINT, 1971 ; selon qui les « chattermarks » ne comportent pas de fissure). L'important est qu'on observe à l'affleurement une suite presque continue de marques de friction reliant les broutures ordinaires (petites entailles plus ou moins arquées dans des stries) aux lunules typiques (grandes fractures

¹ Broutage : mouvement saccadé de certains outils (*Grand Larousse*).

aval-concaves sans lien direct avec des stries), par l'intermédiaire des microlunules définies ci-dessus.

La concavité et l'asymétrie des broutures fournissent de bons critères du sens de l'écoulement de la glace ; nous en présenterons une application plus loin.

SUR LA NOMENCLATURE DES LUNULES GLACIAIRES

Revenons à la nomenclature; non que nous la considérions comme une fin en soi, mais dans les sciences naturelles une nomenclature cohérente est un instrument de travail qui doit permettre une description précise des faits observés et faciliter leur interprétation. En l'occurrence, la classification des lunules doit reposer sur une base purement descriptive, d'autant plus qu'on ne dispose pas encore d'une théorie mécanique satisfaisante de leur genèse.

Nous avons déjà dit que la nomenclature la plus usitée (HARRIS, 1943 ; OKKO, 1950) nous paraît un peu trop chargée ; mais son défaut principal est de mener ces auteurs à la conclusion, reprise dans les traités récents (par ex. FLINT, 1971), que la concavité de ces figures ne permet pas de déduire le sens de l'écoulement de la glace. Or il s'agit là d'un cercle vicieux dû au fait que, dans leurs définitions, ces auteurs mêlent des notions descriptives à d'autres qui sont déjà des déductions. Quant au critère proposé à la place par ces mêmes auteurs, celui du pendage de la fracture, il est démenti par nos observations.

Si on prend le terme *lunule* pour désigner globalement toutes les marques de friction glaciaire (et tectonique) en forme de croissant, alors une revue générale de la littérature montre que pratiquement toutes celles de taille supérieure au cm se laissent classer en deux groupes de morphologie bien distincte : les *entailles* et les *fissures*. Il nous paraît logique d'y ajouter un troisième groupe constitué par les *broutures* des stries, généralement plus petites, même si elles n'ont pas toujours une forme nettement arquée. Or l'attribution préalable d'une lunule à l'un de ces trois groupes morphologiques permet ensuite de déduire de sa concavité le sens du flux glaciaire (comme l'avait fort bien exprimé LJUNGNER, 1930, p. 285). Voici les traits essentiels de ces trois groupes, d'après nos propres observations, et, pour le premier, mal représenté à Saint-Triphon, d'après la littérature :

1. Les *lunules-entailles* (« crescentic gouge », « lunoide furrow », « jagged groove », « Sichelbruch », etc.): marques en forme de croissant laissées par l'arrachage d'un copeau de roche.¹ D'après la littérature,

¹ Le plus simple pourrait sembler de traduire l'anglais « gouge » par gouge, qui est un mot français. C'est pourtant peu recommandable, car gouge désigne l'instrument (un genre de burin) et non la marque qu'il provoque (AGASSIZ avait déjà parlé de « coups de gouge » pour désigner des sculptures glaciaires rectilignes). Nous préférons donc le mot entaille, qui dit fort bien ce qu'il s'agit de dire : la marque laissée par l'arrachage d'un fragment de roche.

ces marques sont presque toujours aval-convexes. Dans les Alpes, elles ont été signalées par LLIBOUTRY (1965) à la Mer de Glace¹. Les entailles aval-concaves (« lunate fracture » de HARRIS, 1943) semblent exceptionnelles : elles n'ont été vues que deux fois par cet auteur, et à notre connaissance jamais redécrites depuis lors ; l'existence de ces exceptions ne devrait donc pas empêcher l'emploi, sur une base statistique, des entailles lunulaires comme critère du sens de l'écoulement de la glace. Le critère du pendage aval du plan de fracture principal, préconisé par HARRIS, n'est pas non plus absolu, car une anisotropie préexistante de la roche peut le renverser (DREIMANIS, 1953).

2. Les *lunules-fissures* (« crescentic fractures », « Parabelrisse ») : ce sont de simples fractures arquées, sans fragment arraché. Nombreuses à Saint-Triphon, nous les avons décrites en détail plus haut. Le critère de la concavité est absolu (littérature et nos observations²), celui du pendage est incorrect.

3. Les *broutures* (« chattermarks », « Miniaturrisse ») : petites entailles ou fissures plus ou moins arquées dans des stries. Le terme *microlunule* est pratique pour décrire celles qui ressemblent le plus aux lunules-fissures. Nos observations à Saint-Triphon montrent que la concavité et le pendage des flancs de l'entaille fournissent, lorsqu'ils sont nets, des critères valables du sens de l'écoulement. Cette conclusion ne semble pas démentie par la littérature, bien que les descriptions détaillées soient encore rares.

Le tableau suivant résume cette discussion :

	Nom	Concavité	Pendage de la fissure ou du flanc le plus développé de l'entaille
Lunules	(1) Lunules-entailles	Généralement aval-convexes (« crescentic gouge », « Sichelbrüche », etc.), rarement aval-concaves (« lunate fracture »)	Généralement aval (influencé par la schistosité).
	(2) Lunules-fissures (« crescentic fractures », « Parabelrisse »)	Toujours aval-concaves	Raide, amont ou aval.
	(3) Broutures (« chattermarks », « Miniaturrisse »)	Aval-concaves (microlunules), rectilignes ou irrégulières	Aval.

¹ Nous les avons vues en quelques autres localités, notamment au Gletschergarten de Lucerne où elles sont très belles. Elles sont aval-convexes dans la proportion d'au moins 95 %.

² Un contre-exemple figuré par SCHULZ (1967), où l'on voit face à face deux systèmes opposés de fissures lunulaires, n'est pas convaincant puisqu'il se trouve sur un bloc erratique qui a pu subir une rotation pendant le transport glaciaire.

L'attribution d'une marque glaciaire à l'un de ces trois groupes est généralement aisée ; ceci fait, on déduit aussitôt de sa concavité le sens de l'écoulement de la glace. Nous concluons que le *critère de la concavité des lunules glaciaires est parfaitement utilisable*, avec cependant quelques réserves pour les lunules-entailles si les observations sont peu nombreuses.

Quant à l'origine de ces structures, on ne possède pas encore d'explication entièrement satisfaisante. Rappelons simplement la théorie du cône de percussion de LJUNGER (1930), qui prétend expliquer simultanément les lunules-entailles et les lunules-fissures, et la comparaison tirée par MACCLINTOCK (1953) avec des expériences de billes d'acier frottant une surface de verre : si la bille glisse sans rouler, elle engendre dans le verre des fissures aval-concaves ; si elle roule, aval-convexes.

ESSAI D'INTERPRÉTATION DES VARIATIONS LOCALES DE DIRECTION DU FLUX GLACIAIRE

L'interprétation de mesures provenant d'affleurements si restreints est très incertaine. Les causes possibles des stries entrecroisées sont en effet multiples, bien que généralement liées aux vicissitudes du retrait glaciaire (CHAMBERLIN, 1885, p. 200-207 ; FLINT, 1971). Les réflexions suivantes doivent donc être considérées comme une hypothèse de travail.

A la carrière du Lessus, les stries ont une direction dominante de 300 à 305°, donc oblique à l'axe de la vallée du Rhône (330°) (fig. 1). On a l'impression qu'une branche glaciaire située à droite des collines débordait vers la gauche par-dessus leur extrémité N. On peut envisager différentes explications de ce phénomène, entre lesquelles des données aussi localisées ne permettent pas de choisir ; par ex. : influence des glaciers latéraux débouchant de la rive droite, ou influence de l'obstacle rencontré par le glacier 1 km plus au N dans la colline du Plantour, etc. Ces stries étant parallèles aux cannelures, dont la formation a demandé plus de temps, on peut en déduire que ce régime était stable. En surimpression sur le maximum de 300-305°, on observe des stries plus jeunes vers 284-294°, et d'autres plus localisées vers 310-314° ; il s'agit de phases d'abrasion tardives et de brève durée, puisqu'elles n'ont pas effacé les stries précédentes.

Un cas intéressant est celui d'un mur haut de plus de 5 m, faisant face à l'ESE, qui est couvert de stries entrecroisées selon deux directions bien distinctes. L'une est verticale à subverticale, c'est la plus ancienne ; des microlunules attestent que la glace a remonté le mur, en glissant de bas en haut (Pl. II, fig. 3). De nombreuses stries plus jeunes plongent de 0 à 20° vers le SSW ; les microlunules montrent cette fois que la glace

fluaient alors vers le SSW, c'est-à-dire dans un sens contraire au sens général de l'écoulement du glacier !

On peut interpréter ces faits ainsi : les stries verticales datent d'une époque où le glacier était encore épais, donc la glace très plastique. Les stries faiblement pentées vers le SSW reflètent un stade tardif au cours duquel le glacier en retrait était déjà très aminci : la glace, moins plastique en raison de la charge plus faible, devait contourner les obstacles au lieu de les surmonter. Nous ignorons si ces deux phases de plasticité différente se sont suivies immédiatement, ou si elles sont séparées par un stade de retrait plus complet du glacier. Dans tous les cas, l'absence de stries de direction intermédiaire est frappante ; cette discontinuité dans le mode d'écoulement de la glace fait penser au franchissement d'un seuil rhéologique.

Il est hasardeux d'estimer l'épaisseur de glace correspondant à ce seuil. On peut envisager, à titre hypothétique, que la phase d'abrasion tardive correspond à un stade de retrait glaciaire bien marqué dans la région par ses moraines latérales à blocs géants, à quelque 100 m au-dessus de la vallée, donc environ 50 m au-dessus des collines (VENETZ, 1861 ; BURRI, 1962). Or 50 m, c'est aussi à peu près la profondeur maximale des crevasses d'un glacier, donc la hauteur de la colonne de glace dont la pression provoque une importante augmentation de la plasticité de ce matériel. Cette coïncidence des chiffres pourrait être significative, et 50 m représenter l'épaisseur approximative nécessaire pour qu'un glacier soit capable de surmonter plastiquement un obstacle vertical de plusieurs mètres.

Des conclusions semblables s'imposent aux Andonces. Nous avons déjà interprété les stries et lunules de cette carrière comme dues à deux phases de directions différentes. Selon cette interprétation, la direction de la plus ancienne (révélée surtout par les lunules, en moyenne 326° , et par des cannelures de même direction) est très proche de l'axe de la vallée (330°) ; elle correspondrait donc à un écoulement glaciaire durable et très plastique, peu influencé par le relief local. Au contraire, la direction du flux plus récent (matérialisée par les stries, en moyenne 345°) est subparallèle au flanc de la colline, donc déterminée par la topographie locale. Il est de nouveau tentant de penser que ce changement reflète le passage à un stade final de moindre plasticité, par diminution de l'épaisseur du glacier.

CONCLUSION

Les carrières de Saint-Triphon offrent une excellente occasion d'étudier le plancher de l'ancien grand glacier du Rhône. L'épaisseur maximale de la glace au-dessus des collines fut de 1100 m (BURRI, 1962 ; JÄCKLI, 1970), mais la plupart des sculptures observées ont sans doute

pris naissance pendant son retrait sous une épaisseur de glace bien moindre. L'obliquité constatée entre diverses générations de stries, ou entre des stries et des lunules, montre l'influence croissante du relief local sur l'écoulement de la glace ; nous l'attribuons à la diminution de sa plasticité par suite de l'amincissement du glacier.

Nous avons prêté un intérêt particulier aux lunules et aux broutures des stries, marques glaciaires dont la netteté et l'abondance confèrent un cachet particulier aux polis de Saint-Triphon, mais dont l'étude avait été jusqu'ici fort négligée dans les Alpes. Nous concluons, en opposition avec une affirmation répandue dans la littérature moderne sur le Quaternaire, que la concavité des lunules peut fournir un bon critère du sens de l'écoulement de la glace, pourvu qu'on sache d'abord classer ces marques dans un petit nombre de catégories morphologiques bien définies.

Depuis les premières études de DE CHARPENTIER (1841), qui en avait tiré argument pour le triomphe de la théorie glaciaire, des stries furent souvent observées dans la vallée du Rhône, mais rarement mesurées (exception : MORLOT, 1866). C'est regrettable, car l'enregistrement systématique des directions et de la chronologie des stries et des lunules, chaque fois qu'un poli glaciaire est mis à nu, apporterait certainement des données intéressantes sur la mécanique de l'écoulement du glacier et sur l'histoire de son retrait. C'est ce que nous avons essayé de montrer en formulant nos hypothèses du chapitre précédent. Ces observations devraient naturellement être complétées par l'étude des dépôts glaciaires sus-jacents, que nous n'avons malheureusement pas eu le loisir d'entreprendre ici. En écrivant cet article, motivés par le souci de décrire des marques glaciaires peu connues dans les Alpes et observées sur des affleurements qui sont aujourd'hui déjà en partie détruits, les auteurs souhaitent contribuer à la connaissance de ce domaine encore plein d'incertitude.

Remerciements

Les auteurs remercient MM. P. Buffat et D. Esva (EPFL) de leur aimable collaboration pour les photographies au microscope à balayage.

BIBLIOGRAPHIE

- AGASSIZ, L. 1847. — *Nouvelles études et expériences sur les glaciers actuels*. Masson, Paris.
- BADOUX, H. 1962. — La géologie des collines de Saint-Triphon. *Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne*, 133 (et *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, 68, 35-48).
- BAUD, A. et MASSON, H. 1975. — Preuves d'une tectonique liasique de distension dans le domaine briançonnais : failles conjuguées et paléokarst à Saint-Triphon (Préalpes vaudoises). *Eclogae geol. Helv.*, sous presse.

- BURRI, M. 1962. — Les dépôts quaternaires de la vallée du Rhône entre Saint-Maurice et le Léman. *Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne*, 132.
- CHAMBERLIN, T. C. 1888. — The rock-scorings of the great ice invasions. *U.S. Geol. Surv., 7th Ann. Rep.*, 147-248.
- DE CHARPENTIER, J. 1841. — *Essai sur les glaciers*. Ducloux, Lausanne.
- DREIMANIS, A. 1953. — Studies of friction cracks along shores of Cirrus lake and Kasakokwag lake, Ontario. *Am. J. Sci.*, 251, 769-783.
- FLINT, R. F. 1955. — Pleistocene geology of eastern South Dakota. *Geol. Surv. Prof. Paper* 262.
- 1971. — *Glacial and Quaternary geology*. J. Wiley, New York.
- HARRIS, S. E. 1943. — Friction cracks and the direction of glacial movement. *J. Geol.*, 51, 244-258.
- JÄCKLI, H. 1970. — La Suisse durant la dernière période glaciaire. *Atlas de la Suisse 1 : 500 000*, Service topographique fédéral, Berne.
- KAMB, B. et LA CHAPELLE, E. 1964. — Direct observation of the mechanism of glacier sliding over bedrock. *J. Glaciol.*, 5, 159-172.
- LAHEE, F. H. 1912. — Crescentic fractures of glacial origin. *Am. J. Sci.*, (4) 33, 41-44.
- LJUNGNER, E. 1930. — Spaltentektonik und Morphologie der schwedischen Skagerrak-Küste, III. *Bull. geol. Inst. Univ. Uppsala*, 21, 255-477.
- LLIBOUTRY, L. 1965. — *Traité de glaciologie, II*. Masson, Paris.
- MACCLINTOCK, P. 1953. — Crescentic crack, crescentic gouge, friction crack, and glacier movement. *J. Geol.*, 61, 186.
- MORLOT, A. 1866. — Le roc poli de Chillon. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.*, 9, 250-252.
- OKKO, V. 1950. — Friction cracks in Finland. *Bull. Comm. géol. Finlande*, 150, 45-50.
- ROLLIER, L. 1889. — Excursion de la Société géologique suisse au Weissenstein et dans le Jura bernois. *Eclogae geol. Helv.*, 1/3, 263-290.
- 1908. — Polis glaciaires dans le Jura français. *Bull. Soc. Belfortaine d'émulation* 27.
- SCHULZ, W. 1962. — Sichelförmige Marken auf Quarzitgeschieben von Feldberg in Mecklemburg und Halle (Saale). *Geologie*, 11, 1102-6.
- 1967. — Über glazigene Schrammen auf dem Untergrund und sichelförmige Marken auf Geschieben in Norddeutschland. *Geogr. Berichte*, 43/2, 125-142.
- VENETZ, I. 1861. — Mémoire sur l'extension des anciens glaciers, renfermant quelques explications sur leurs effets remarquables. *Nouv. Mém. Soc. Helv. Sc. Nat.*, 18.
- VIVIAN, R. 1970. — Hydrologie et érosion sous-glaciaire. *Rev. géogr. alpine*, 58, 241-264.
- WEGMANN, E. et SCHAER, J.-P. 1957. — Lunules tectoniques et traces de mouvements dans les plis du Jura. *Eclogae geol. Helv.*, 50/2, 491-496.

Manuscrit reçu le 7 octobre 1974.