Sur l'origine de la cornieule par fracturation hydraulique

Autor(en): **Masson, Henri**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **65 (1972)**

Heft 1

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-164074

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv.	Vol. 65/1	Pages 27–41	2 figures dans le texte	Bâle, mars 1972

Sur l'origine de la cornieule par fracturation hydraulique

par HENRI MASSON

Institut de Géologie, Université de Lausanne, Palais de Rumine, 1005 Lausanne

ABSTRACT

Cornieule (= Rauhwacke) is a dolomitic breccia widely occurrent in the Trias of the alpine belt. We suggest that this rock results from a process of brecciation by *hydraulic fracturing* due to the very high pore-water pressure at the base of the alpine nappes. In this way we explain the unusual characteristics of this rock, in particular the paradoxal coexistence of features typical of a tectonic breccia with features similar to those of a sedimentary clastic rock. This also explains the great tectonic mobility of cornieule.

As a conclusion we develop more general considerations on the role of fluid pressure in the mecanism of *tectonic brecciation*. Two types of tectonic breccias are distinguished: I. those formed under conditions of low fluid pressure and high friction (ordinary tectonic breccias and mylonites). II. those formed under conditions of high fluid pressure and weak friction (e.g. cornieule); influence of the stratigraphic succession on the position of the surface of dislocation is greater in this second case.

RÉSUMÉ

Nous proposons d'expliquer l'origine de la *cornieule* par un mécanisme de bréchification par *fracturation hydraulique*, sous l'effet des pressions fluides anormalement élevées qui règnaient notamment à la base des nappes lors de leur mise en place. Ainsi s'expliquent de manière naturelle les propriétés de cette roche: localisation souvent stratigraphique, mobilité tectonique, inclusion fréquente d'éléments étrangers, diverses particularités de structure et de composition, et, plus généralement, un mélange paradoxal de caractéristiques de brèche sédimentaire et de brèche tectonique.

En conclusion, nous développons des considérations plus générales sur les rôles respectifs de la pression fluide et de la friction dans la genèse des brèches tectoniques.

I. Quelques particularités de la cornieule

a) Introduction

La cornieule, variété de brèche dolomitique à ciment calcaire commune dans le Trias alpin, pose des problèmes mal résolus.

La définition même de la cornieule est souvent entachée d'erreurs ou d'ambiguïtés. Ainsi certains ouvrages la présentent comme une brèche à éléments calcaires et ciment dolomitique, ce qui est l'inverse de la réalité. Ces errements, accompagnés par diverses déformations de l'orthographe du terme, semblent remonter au siècle dernier et s'être répétés depuis lors par copie conforme de livre en livre.

Par ailleurs de nombreux auteurs mettent l'accent, dans leur définition, sur l'aspect vacuolaire ou caverneux que présente très souvent la cornieule à l'affleurement. Il s'agit là d'un phénomène secondaire d'altération, qui disparaît le plus souvent à très faible profondeur; il résulte de la dissolution préférentielle des éléments dolomitiques

de la brèche par rapport au ciment, ce dont divers auteurs ont offert diverses explications (voir LEINE 1968, p. 70–74). Le mot «corniolisation», par ailleurs fort commode, se ressent de cette ambiguïté; en effet, selon les auteurs, il se rapporte soit à la bréchification de la roche, soit à la dissolution des éléments, soit tour à tour à l'un et à l'autre, soit encore simultanément aux deux phénomènes considérés comme conjoints. Une large part de l'abondante littérature sur la genèse de la cornieule souffre de ces confusions. C'est la structure bréchique de la cornieule qui nous intéresse ici, et nous laisserons de côté le problème de son altération.

Les théories sur l'origine de la cornieule sont nombreuses et contradictoires. Une revue récente des principales d'entre elles est présentée par LEINE (1968, 1971). En tout temps, de SCHARDT (1885) à LEINE (1971), des géologues défendirent l'idée de l'origine de la cornieule par bréchification tectonique. Mais simultanément, à chaque époque, d'autres savants en relevèrent les difficultés et développèrent des théories opposées. Dans ce premier chapitre, nous allons présenter tout d'abord, d'après la littérature et nos propres observations, les principaux arguments appuyant l'origine tectonique de la cornieule, puis les obstacles rencontrés par cette même explication. Ensuite nous tenterons de lever la contradiction en introduisant un concept nouveau dans le schéma classique de la bréchification tectonique.

Afin de lever toute ambiguïté sur la roche considérée, précisons que nous nous référons aux cornieules typiques telles qu'on les trouve dans le Trias des nappes préalpines (en particulier dans le district d'Aigle, d'où le mot «cornieule» semble être originaire; cf. WEIDMANN 1971), ou dans l'autochtone helvétique (notamment au-dessus de Martigny, où un «Col des Cornieules» figure depuis longtemps sur la carte topographique).

b) Arguments en faveur de l'origine tectonique de la cornieule

En faveur d'une origine tectonique de la cornieule, mentionnons notamment les faits suivants:

– sa localisation fréquente (bien que non exclusive) au voisinage des plans de chevauchement des nappes;

– sa disposition parfois nettement discordante sur la stratigraphie (GENGE 1952);

– l'absence de galets de cornieule dans les conglomérats alpins antérieurs au charriage des nappes. Cette absence est particulièrement frappante dans le Jurassique de la nappe de la Brèche, pourtant constitué essentiellement à partir de matériel triasique, et dans les conglomérats éocènes de la nappe de Morcles, dont certains niveaux sont également riches en éléments triasiques;

– l'inclusion possible dans la cornieule de fragments de roches post-triasiques (DE RAAF 1934; JÄCKLI 1941, p. 52–53), voire même de fragments de roches affectées par le métamorphisme alpin, pris dans une matrice non métamorphique (LEINE 1968; cf. BONNEY 1890);

– dans certains cas: la disposition du ciment calcaire en cloisons planes, plus ou moins parallèles à un petit nombre de directions constantes, et délimitant des fragments ou des chambres polyédriques (cornieules «cloisonnées» de FAVRE et SCHARDT 1887). Ces cloisons peuvent correspondre à des systèmes de diaclases dans les dolomies avoisinantes (SCHARDT 1885); elles présentent parfois des relations d'intersection indiquant un âge différent pour chaque système (LEINE 1968; observation fréquente dans les Préalpes).

La démonstration très convaincante de SCHARDT (1885) mérite d'être rappelée: «Si l'on examine attentivement des fragments de cette brèche, on remarque dans certains échantillons que la structure n'est pas sans régularité; on constate que les parois qui séparent les fragments sont sensiblement parallèles et s'entrecroisent, suivant trois directions, de manière à former des chambres parallélipipèdes, forme qu'ont aussi les fragments dolomitiques qui les remplissent. Cette régularité n'est cependant qu'exceptionnelle, et le plus souvent la structure des cargneules est celle d'une *brèche* dont les fragments polyédriques sont irrégulièrement disposés. Toutefois cette orientation des fragments de dolomie dans la cargneule indique clairement le mode de formation de cette roche... En rapprochant maintenant les deux observations, celle de la structure régulière de certaines cargneules et celle de la fissuration des dolomies qui les accompagnent, on sera conduit presque involontairement à la conclusion suivante: Si un banc de calcaire dolomitique, fendillé par des leptoclases, subit une légère dislocation qui a pour conséquence un écartement ou même une désorientation des fragments, ceux-ci n'auront qu'à être recimentés par des infiltrations calcaires..., et il en résultera une roche identique à la cargneule.» Puis SCHARDT ajoute que les cornieules se sont formées simultanément ou postérieurement au redressement des couches. On n'a guère dit mieux depuis lors sur ce sujet.

Reconnaissons pourtant que ce mode de genèse, établi par l'étude de cornieules cloisonnées, ne paraît pas d'emblée applicable à toutes les variétés de cette roche; et l'on comprend que certains auteurs aient hésité à le généraliser à des cornieules d'aspect plus conglomératique, ou aux cornieules polymictes. D'ailleurs SCHARDT lui-même n'appliquait sa théorie qu'aux seules cornieules dont il reconnaissait la liaison avec les assises triasiques. Il croyait, à tort, pouvoir placer dans des terrains plus jeunes d'autres cornieules affleurant dans un contexte tectonique plus compliqué (idée contre laquelle RENEVIER lutta vigoureusement); il attribuait à une partie de ces dernières une origine sédimentaire, en raison de leur nature polymicte et de leur stratification souvent distincte. On touche ici aux limites de la théorie de la genèse de la cornieule par bréchification tectonique ordinaire (brèche de friction).

c) Difficultés de l'explication tectonique

Cependant les mécanismes ordinaires de bréchification tectonique paraissent difficilement aptes à expliquer d'autres faits, tels que:

– la disposition fréquemment *stratiforme et concordante* de la cornieule, soit à l'échelle de la carte, soit à celle de l'affleurement, où on voit parfois la cornieule alterner banc par banc avec d'autres roches, y compris des dolomies non bréchiques (p. ex. JEANNET 1913, p. 177–178; «Bänder-Rauhwacke» de BRUNNSCHWEILER 1948, p. 108). Reconnu depuis longtemps (RENEVIER 1891), ce fait fut souvent présenté comme un argument déterminant en faveur d'une origine sédimentaire de la cornieule[1]). Cependant d'autres auteurs ont relevé qu'on ne peut opposer absolument cette constatation à l'hypothèse d'une bréchification tectonique, car rien n'empêche que

[1]) Sur les plans méthodologique et historique, il importe de noter que les auteurs qui, tel RENEVIER, soulignaient au siècle dernier la concordance stratigraphique de la cornieule, luttaient alors contre des théories métasomatiques complètement abandonnées de nos jours. L'usage de l'argument stratigraphique chez ces anciens auteurs est très semblable à celui, plus récent, du même argument dans les discussions relatives à l'origine du granite, des migmatites, ou de certains gîtes métallifères: le comportement de ces roches vis-à-vis de l'ordre stratigraphique fournit l'un des plus importants fils conducteurs dans l'élucidation de leur genèse (critère de «congruence» ou de «symétrie», cf. AMSTUTZ 1966). Ainsi pour la cornieule, sa localisation fréquemment conforme au dispositif stratigraphique régional ou local mène avec beaucoup de force à l'idée d'une origine sédimentaire de cette roche.

Aujourd'hui l'idée d'une origine métasomatique de la cornieule est abandonnée, et si l'on recense les exceptions à la règle de la localisation stratigraphique, c'est en faveur d'une origine tectonique, seule compatible avec l'ensemble des faits relevés plus haut. Il n'en reste pas moins que, malgré certaines exceptions significatives, la règle générale énoncée par RENEVIER et réaffirmée maintes fois depuis lors est un fait d'observation qui appelle lui aussi une explication.

la tectonisation suive un niveau stratigraphique. Dans certains cas, une analyse stratigraphique minutieuse permet même de démontrer que des niveaux stratiformes de cornieule ne sont, en fait, stratigraphiques qu'en apparence; telle la «cornieule supérieure» des Préalpes médianes, «niveau sédimentaire déterminé» selon JEANNET (1913, p. 185) et les auteurs subséquents, mais en réalité cicatrice tectonique selon les recherches récentes de BAUD (1972). De plus, comme nous l'avons déjà noté, il arrive aussi que la cornieule soit manifestement discordante. *Il n'en reste pas moins que la quasi-concordance stratigraphique de la cornieule est un trait si répandu et si frappant de la localisation de cette roche qu'on aurait tort de l'écarter trop lestement de la discussion.* Il ne suffit pas d'affirmer que la localisation stratigraphique ou quasi-stratigraphique d'une roche ne s'oppose pas formellement à son origine tectonique; il faut encore proposer un mécanisme tectonique précis qui implique que cette forme particulière de bréchification suive très fréquemment (au moins en première approximation) des niveaux stratigraphiques;

– la *juxtaposition ou l'alternance de cornieule avec des roches moins résistantes* (argilite, etc.) *qui ne présentent aucune trace d'écrasement ou de fragmentation*[2]). Cette constatation, jointe à la précédente, montre que la localisation de la zone bréchifiée est souvent déterminée par les paramètres physiques de la succession lithostratigraphique, mais que ces paramètres ne se rapportent pas, ou pas exclusivement, aux propriétés purement mécaniques des roches (telles que la résistance, etc.);

– l'inclusion assez fréquente de fragments de roches étrangères *(cornieules polymictes)*, chose inhabituelle dans les mylonites. On peut certes envisager un mélange tectonique de fragments arrachés le long d'une surface de faille; mais, appliquées à de vastes horizons de cornieules polymictes, les explications de ce mélange basées sur la bréchification mécanique ordinaire en milieu solide ne tardent pas à devenir un peu pénibles (cf. CORNELIUS 1927). Cet obstacle ne fut jamais entièrement surmonté par les tenants de l'origine tectonique[3]). A ce propos notons encore que: 1. parmi ces roches étrangères se trouvent souvent des fragments d'argilite tendre dont on peut se demander comment ils ont échappé au broyage, alors qu'ils sont entourés de fragments de roches dures. 2. Ces fragments tendres sont volontiers arrondis (mais nullement écrasés), à la manière de galets ordinaires usés par le transport (fig. 1);

– la nature calcaire du *ciment*, alors que les éléments sont en majorité ou en totalité dolomitiques. Rappelons en effet que selon les études détaillées de CAYEUX (1935, p. 165–175), un des critères essentiels des brèches tectoniques est l'identité chimique des éléments et du ciment, ce dernier provenant de l'écrasement in situ de la roche dont sont formés les premiers. CAYEUX (p. 167–168) discute même le cas d'un échantillon de brèche dolomitique à ciment calcaire (qui, à lire sa description, pourrait bien être une cornieule), et qui lui fut remis comme brèche tectonique; il s'insurge contre cette idée: «Cette indépendance des matériaux remaniés et de la gangue ne peut s'expliquer si la brèche est tectonique. Dans toute brèche engendrée par des

---

[2]) Cf. DE RAAF (1934, p. 35), partisan de la bréchification tectonique de la cornieule, mais observant à son contact du flysch intact: «Nous nous demandons pourquoi – si notre explication est juste – l'effet du broyage se voit seulement dans les assises triasiques.»

[3]) Insuffisantes apparaissent les tentatives d'explication basées sur l'effet lubrifiant attribué à la poussière provenant de la trituration des fragments (par ex. LEINE 1968). D'ailleurs, comme nous le relevons plus loin, le ciment des cornieules n'est *pas* un produit de broyage.

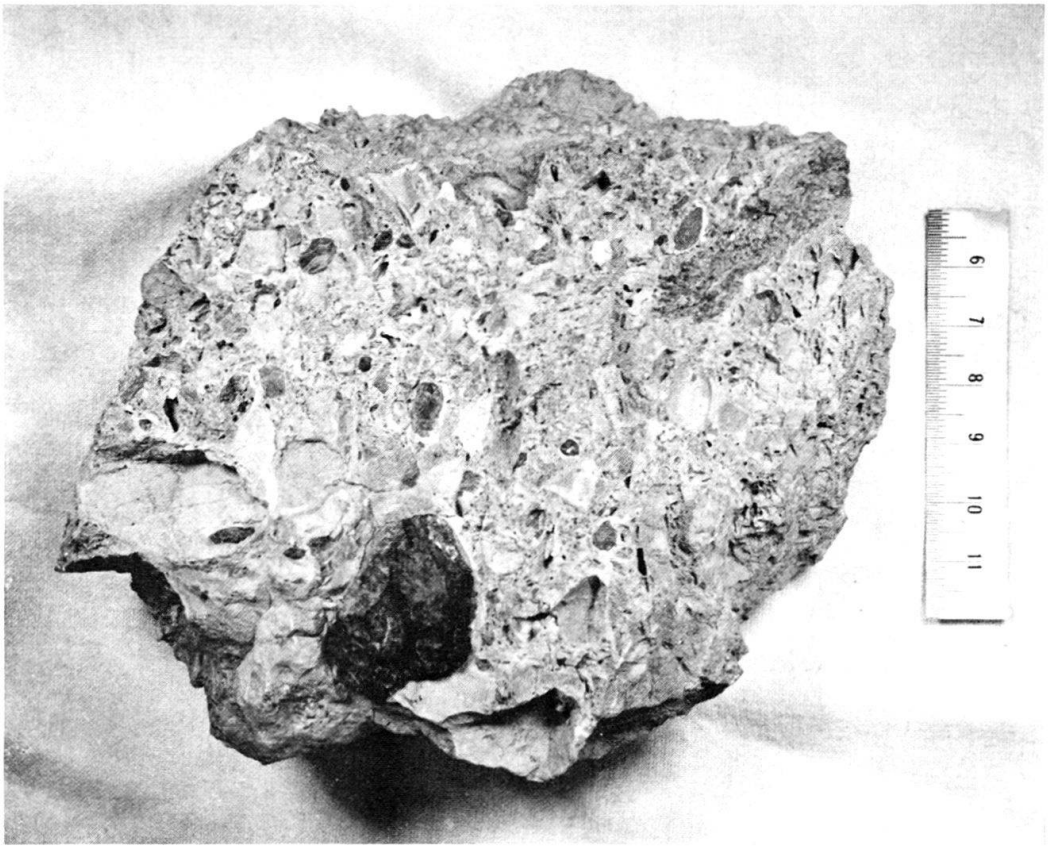

Fig. 1. Cornieule polymicte. Les éléments sombres sont des galets argileux arrondis, tandis que les éléments clairs sont des fragments dolomitiques (en partie érodés, laissant à leur place des cavités). Le tout est pris dans une matrice calcaire. Provenance: «cornieule supérieure» des Préalpes médianes, Pont de la Tine, vallée de la Grande Eau (Vaud).

agents tectoniques, la gangue n'est pas autre chose que le produit ultime de l'écrasement des grands éléments.»;

– de manière plus générale, on constate que les cornieules portent la marque d'un processus de *fragmentation*, mais habituellement *pas d'écrasement*, ce en quoi elles diffèrent nettement des roches mylonitiques ordinaires.

On pourrait allonger la liste. Mais déjà on voit bien que, *si les cornieules sont des brèches tectoniques, ce ne sont pas des brèches tectoniques ordinaires.*

II. Bréchification par fracturation hydraulique

Nous proposons d'expliquer l'ensemble de ces faits par un mécanisme de bréchification par fracturation hydraulique, sous l'effet des fortes pressions d'eau qui règnaient notamment dans les zones de décollement à la base des nappes. On sait en effet qu'une pression fluide élevée[4]) est un facteur déterminant de la mise en place des nappes en

[4]) Par pression fluide élevée, nous entendons ici une pression «anormale», nettement supérieure à la pression fluide «normale» ou «hydrostatique» (qui représente le poids par unité de surface de la colonne d'eau à la profondeur considérée). On sait que les valeurs anormales de la pression fluide peuvent avoisiner celles de la pression lithostatique (= poids de la colonne de roche) (RUBEY et HUBBERT 1959).

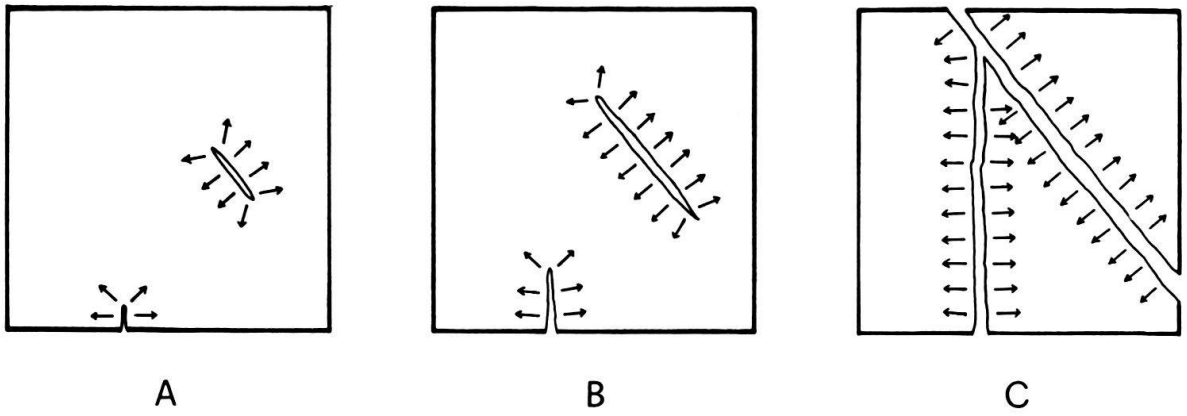

Fig. 2. Bréchification par fracturation hydraulique.
a) Stade initial: la pression fluide se manifeste dans tout interstice de la roche.
b) En conséquence, les fissures s'agrandissent.
c) Finalement, la roche est complètement bréchifiée (fragments baignant dans l'eau sous pression).
Remarque importante: Pour simplifier, les contraintes transmises dans le solide ne sont pas représentées dans ce schéma. Elles peuvent revêtir des formes très diverses. Elles interviennent notamment par leur anisotropie habituelle, qui détermine la direction préférentielle de fissuration.

diminuant la friction basale (HUBBERT et RUBEY 1959); elle empêche par là-même la mylonitisation des roches le long du plan de chevauchement (ce qui s'oppose aussi à l'idée que la cornieule soit une brèche tectonique ordinaire; nous développerons ce point en conclusion). On peut s'attendre, en revanche, à ce que la pression fluide elle-même agisse sur certaines roches en provoquant leur bréchification.

Nous nous bornerons ici à rappeler brièvement le principe de la fracturation hydraulique, renvoyant pour de plus amples développements le lecteur aux publications citées. L'expression «fracturation hydraulique» désignait à l'origine un procédé de fragmentation artificielle des roches, par l'injection d'eau sous forte pression dans les puits de pétrole, afin d'en améliorer la récupération (HUBBERT et WILLIS 1957). Les tectoniciens retinrent le nom et l'idée; ils les appliquent à divers problèmes tels que l'intrusion des filons magmatiques, ou plus récemment l'origine des diaclases (SECOR 1965 et 1968). A notre connaissance, on n'a pas encore invoqué ce phénomène comme mécanisme de bréchification des roches[5]); c'est la suggestion que nous faisons ici, car nous pensons que cet effet tient un rôle important dans la genèse de certaines brèches.

Théoriquement, si le fluide agit sur une surface absolument lisse, aucune fracture ne naît. Mais pratiquement, il suffit d'un infime interstice, d'une simple irrégularité de la surface, pour que le fluide sous forte pression l'agrandisse en une fracture ouverte qui peut s'étendre indéfiniment (fig. 2). L'orientation de ces fractures dépend en principe de l'orientation des contraintes principales dans le solide, et HUBBERT et WILLIS ont énoncé des règles simples indiquant, dans des cas simples, si elles sont verticales ou horizontales. Peut-être ces critères s'appliquent-ils directement à certaines cornieules, surtout fréquentes en milieu relativement peu tectonisé, caractérisées par des cloisons calcaires parallèles à un petit nombre de directions constantes (cornieules

[5]) Sauf naturellement pour les brèches éruptives, qui sont en partie redevables de leur origine à un mécanisme analogue (bien qu'on l'exprime généralement en d'autres termes).

cloisonnées). Cependant les conditions mécaniques de genèse des cornieules sont sans doute très souvent beaucoup plus compliquées que tous les modèles actuellement susceptibles d'une analyse mathématique rigoureuse (en milieu orogénique les champs de contraintes ne sont pas immuables, bien au contraire, et peuvent favoriser la fracturation selon diverses directions successives; il faut de plus considérer l'effet variable, mais souvent important, de l'anisotropie héritée, des plans de faiblesse préexistants, etc.). En extrapolant subjectivement les résultats des travaux cités, *nous tenons pour plausible qu'une roche assez cassante, soumise à l'action d'une pression fluide avoisinant la pression lithostatique, puisse être fragmentée selon des plans de fracture d'orientation variée, jusqu'à bréchification complète.*

A cet effet direct des fluides s'en ajoute un autre, d'ailleurs théoriquement lié au précédent, qui facilite la fracturation de la roche. De nombreuses expériences ont montré que la résistance d'une roche poreuse imprégnée par un fluide sous pression est très inférieure à la résistance de la même roche sèche (ROBINSON 1959; HANDIN et al. 1963; JAEGER 1963). Théoriquement on exprime la chose en utilisant, dans l'application des critères de rupture, une «contrainte effective» égale à la contrainte totale moins la pression du fluide (HUBBERT et RUBEY 1959; JAEGER 1962, p. 166–170). Le plus simple est de considérer que le fluide induit dans la roche un état de traction uniforme; la contrainte intervenant effectivement dans la rupture est la somme (algébrique) de cette traction uniforme et des contraintes transmises dans la fraction solide du système. Il en résulte une diminution des contraintes normales, alors que les contraintes cisaillantes demeurent inchangées, ce qui facilite la rupture d'une roche en compression. Si la différence des contraintes principales n'est pas trop grande, la roche pourra cependant résister à la compression; et alors, en cas de forte pression fluide, l'une des contraintes effectives principales devient une contrainte de traction (cf. SECOR 1965, fig. 8). Dès que cette dernière excède la résistance de la roche à la traction (couramment 20 à 30 fois plus faible que la résistance à la compression), la roche se rompt; on retombe ainsi sur la fracturation hydraulique au sens strict. *Ainsi peuvent naître des fissures d'extension dans des roches soumises à des contraintes «solides» de compression.* Au cas où la pression fluide atteindrait rapidement, voire dépasserait la pression lithostatique (ce que nous tenons pour possible pendant une courte période), la roche pourrait pénétrer fortement dans le domaine de traction; il en résulterait une fragmentation très vive selon des plans de fracture diversement orientés.

En appliquant ces concepts à la genèse de la cornieule, il faut tenir compte de deux propriétés particulières des dolomies: 1. La dolomie est une roche plus «compétente», c'est-à-dire moins ductile et plus cassante, que les autres roches sédimentaires courantes (cf. GRIGGS et HANDIN 1960); 2. Les dolomies ont souvent une porosité assez forte, en moyenne supérieure à celle des calcaires (ce fait est bien connu, car il confère une grande importance aux dolomies comme réservoirs de pétrole; cf. CHILINGAR et TERRY 1954; LANDES 1946; MURRAY 1960). A cette porosité diagénétique peut s'ajouter une porosité d'origine tectonique due à la fissuration facile de cette roche. Il apparaît donc plausible qu'en milieu de forte pression fluide, la dolomie se révèle plus sensible que les autres roches courantes à la fragmentation par fracturation hydraulique. Cependant la présence, dans les cornieules polymictes,

d'abondants fragments non dolomitiques, semble montrer que d'autres roches peuvent aussi subir, sous certaines conditions, une fragmentation analogue[6]).

Dès lors on conçoit que certains niveaux dolomitiques captent préférentiellement les fluides sous pression, par suite de leur porosité et de leur perméabilité originelles ou résultant des premiers mouvements tectoniques. D'ailleurs il est possible que la fissuration initiale ait une origine purement tectonique (effet de contraintes «solides»). Elle ouvrirait la voie à l'infiltration des fluides sous pression, qui dès lors conditionneraient les transformations de la roche et lui imprimeraient ses caractères essentiels. Une fois amorcé, ce processus fonctionnerait en quelque sorte de façon autocatalytique, toute fissure nouvelle provoquant un appel de fluides, et toute arrivée de fluides ouvrant de nouvelles fissures à partir des interstices préexistants. Le phénomène ne s'arrête que lorsque la souce de fluide tarit, ou lorsque le niveau est complètement bréchifié. Ce niveau tient alors lieu de réservoir de fluides sous pression anormalement forte, et on comprend le rôle tectonique important de la cornieule comme semelle glissante à la base des nappes. La roche bréchifiée pourrait alors se comporter comme une «bouillie» de fragments dolomitiques baignant dans un fluide à forte pression[7]).

Quant à l'origine des fluides et aux causes de leur pression anormale, on se référera à la littérature récente sur ce sujet (causes souvent invoquées: compaction des sédiments, pression d'origine tectonique, déshydratation de minéraux argileux ou du gypse; ce dernier facteur a vraisemblablement joué un rôle important dans le Trias alpin). Nous ajouterons seulement que deux facteurs nous paraissent aussi susceptibles d'avoir contribué, en plus des autres, à établir une pression fluide anormalement élevée: 1. un accroissement du flux de chaleur (plausible en milieu orogénique), et 2. la remontée rapide d'assises profondes corrélativement à une érosion active en

---

[6]) On a signalé en Espagne des roches semblables à la cornieule, engendrées par la bréchification non pas de dolomie, mais de marne (cf. LEINE 1968, p. 22; rappelons aussi que, parmi les fragments non dolomitiques des cornieules polymictes, les roches argileuses ou marneuses sont courantes). On peut vraisemblablement leur attribuer une origine analogue. En effet, les couches argileuses peuvent être également propices à l'établissement d'une pression fluide anormalement élevée, d'une part en vertu de leur faible perméabilité (HUBBERT et RUBEY 1959, p. 158), d'autre part ensuite de la déshydratation éventuelle de leurs constituants silicatés.

[7]) Nous nous inspirons de l'image de la «purée de cristaux» (masse de cristaux lubrifiée par une phase fluide peu abondante) qui schématise l'une des théories les plus en honneur sur la mise en place des péridotites.

Concernant la cornieule, nous avons retrouvé une image analogue sous la plume de JÄCKLI (1941, p. 55). Se basant sur le fait, révélé par les galeries pour les ouvrages de génie civil, qu'en profondeur la cornieule contient souvent beaucoup d'eau, cet auteur parle de «breiige Flüssigkeit» et de «Rauhwacke-Suppe» (voir aussi GIGNOUX et BARBIER 1955, p. 258); admettant que ces propriétés valaient déjà à l'époque de la tectonisation, il explique ainsi plusieurs particularités structurales de la cornieule. Malheureusement les remarques de JÄCKLI ne semblent guère avoir retenu l'attention des auteurs plus récents.

Cependant il faut remarquer que l'eau rencontrée en profondeur dans la cornieule appartient à la nappe aquifère actuelle, sans relation avec l'eau «tectonique» ancienne. C'est en particulier ce qu'ont montré les recherches en galerie dans le Mont d'Or (voir NORBERT 1968), où l'eau qui causa de grosses difficultés lors de la traversée d'une bande de cornieules avait la même pression que dans les calcaires constituant le reste du massif. La comparaison de JÄCKLI entre l'état de la cornieule pendant les événements tectoniques et celui souvent observable actuellement en profondeur n'a donc qu'une valeur d'analogie, et non d'explication génétique.

surface (même remarque). Si les roches imprégnées de fluides sont entourées de bancs très peu perméables, nous suggérons que la pression fluide a même pu dépasser momentanément la pression lithostatique (dans la littérature, l'égalité de ces deux pressions est toujours considérée comme un cas limite); nous avons déjà mentionné la vigoureuse fragmentation qui dut en résulter. Il faut de plus considérer qu'un état de forte traction uniforme s'instaure alors à l'intérieur des blocs isolés au sein de la «bouillie», ce qui ne saurait manquer d'accroître encore leur fragmentation.

La bréchification par fracturation hydraulique pourrait encore donner lieu à de longs développements qui sortiraient du cadre de cet article. Par exemple, dans un contexte géologique très différent, nous envisageons volontiers que certaines agmatites puissent résulter d'un mécanisme analogue. En effet, les recherches modernes ont montré que la migmatisation se déroule avec une intensité particulière dans les zones profondes où règnait une pression d'eau élevée, probablement comparable à la pression lithostatique; on conçoit que les conséquences de cette forte pression fluide ne soient pas seulement de nature pétrogénétique (anatexie, diffusion plus rapide, etc.), mais aussi structurale (fracturation de niveaux «compétents» tels que les amphibolites).

III. Elucidation des particularités de la cornieule

Selon notre théorie, la localisation des cornieules reflèterait donc celle des zones de forte pression fluide. Or on sait que la circulation et la pression des eaux profondes sont conditionnées dans une très large mesure par la succession lithostratigraphique. Ainsi s'explique de manière simple et naturelle que la localisation de la cornieule concorde fréquemment avec la stratigraphie régionale.

Cependant les fluides sous pression peuvent migrer le long de toute discontinuité tectonique ou stratigraphique: ils y engendreront, si la roche s'y prête, des cornieules non stratiformes (p. ex. GENGE 1952 et 1958). On peut alors concevoir que la «bouillie de fragments» sous pression s'injecte dans des fissures, en se mêlant de blocs arrachés aux parois, selon un mécanisme rhéomorphique analogue à l'intrusion des filons clastiques (cf. LAUBSCHER 1961 b).

Ainsi s'explique également la mobilité tectonique de la cornieule. Ce comportement très mobile, qu'illustre le rôle important de la cornieule comme horizon de décollement et de glissement à la base des nappes, et qui peut aussi évoquer la tectonique salifère, reste inexplicable si on considère les cornieules dans leur état actuel; en revanche il apparaît parfaitement naturel si on songe que la cornieule était à l'époque une masse incohérente imprégnée d'eau sous forte pression.

Jusqu'à présent les auteurs ont cherché à expliquer cette mobilité tectonique de la cornieule en imaginant qu'elle était passivement entraînée par des roches très mobiles telles que le gypse, l'anhydrite ou le sel[8]). Ainsi ELLENBERGER (1958, p. 210) s'exprime: «La chose ne se comprend que si on remplace par la pensée la cargneule par une masse de roches concassées, emballées dans l'anhydrite ou le sel gemme. C'est un tel ‹magma› salifère qui s'injectait dans toutes les surfaces de cisaillement... Dans leur état actuel,

[8]) C'est peut-être l'une des raisons du succès des théories de l'origine de la cornieule par des mécanismes liés à la présence de gypse (p. ex. la théorie de CORNELIUS 1927; ou celle de BRÜCKNER 1941).

les cargneules n'auraient certainement pas pu jouer ce rôle de lubrifiant tectonique. Il faut ainsi admettre que nos grandes masses d'anhydrite ne sont que des résidus...». Or, si la cornieule accompagne souvent le gypse, l'anhydrite, et le sel, la réciproque est loin d'être vraie; la cornieule peut aussi former des niveaux étendus sans être associée à aucune de ces roches, et il est tout de même un peu difficile d'admettre que des quantités aussi énormes de gypse aient totalement disparu par dissolution. Au «magma salifère» d'ELLENBERGER nous préférons donc la «bouillie» sous forte pression fluide.

D'ailleurs, dans un sens cela revient au même si, selon les travaux de HEARD et RUBEY (1966), la grande mobilité tectonique du gypse résulte moins de sa plasticité propre que des fortes pressions fluides engendrées par sa déshydratation (cf. LAUBSCHER 1961a, p. 250). Ainsi, dans un cas comme dans l'autre, ce seraient les fluides sous pression qui détermineraient la mobilité des roches; il devient donc inutile d'invoquer du gypse disparu lorsqu'on ne l'observe pas aujourd'hui. En revanche nous pensons que, là où le gypse existe en association avec la cornieule, sa déshydratation peut être à l'origine de l'eau qui a envahi et bréchifié cette dernière. La présence de gypse favorisait donc la naissance de la cornieule; ainsi l'association fréquente de ces deux roches n'est pas une coïncidence fortuite, même si elle ne constitue nullement une règle générale.

Notre théorie explique aussi pourquoi la cornieule n'est pas invariablement associée à des surfaces de transport tectonique: une forte pression fluide agissait dans le niveau bréchifié, et en faisait un niveau de décollement potentiel; mais le décollement a pu se produire ou ne pas se produire selon le contexte tectonique. Le facteur important dans cette forme particulière de bréchification dynamique est donc moins le transport le long de la zone bréchifiée que la forte pression fluide qui y règnait; bréchification et décollement sont deux conséquences distinctes de cette pression fluide anormale, allant souvent de pair mais pas nécessairement.

La théorie de la bréchification par fracturation hydraulique permet encore de fournir une explication naturelle des autres particularités relevées plus haut. En particulier on ne s'étonne plus devant la juxtaposition d'un banc de cornieule à un banc intact d'une roche plus tendre, puisqu'en milieu de forte pression fluide la bréchification d'une roche est déterminée moins par sa résistance mécanique que par son comportement hydraulique. Les bancs de cornieule interstratifiés dans des bancs dolomitiques non fragmentés s'expliquent de la même manière, si on admet que les paramètres physiques régissant la circulation des fluides et leur pression (porosité et perméabilité, originelles ou acquises tectoniquement) variaient d'un banc à l'autre.

Enfin on s'explique sans peine l'introduction et le remaniement de fragments étrangers au sein de la «bouillie»; ainsi s'évanouit un obstacle que la théorie de l'origine tectonique de la cornieule sous sa forme classique (brèche de friction née en milieu strictement solide) n'avait jamais réussi à surmonter parfaitement. On comprend aussi l'usure variable mais souvent faible des fragments, car l'eau sous pression les protégeait de l'écrasement mutuel. La préservation remarquable des éléments argileux résulte de cette forte diminution de la friction interne par la pression fluide. Si toutefois les fragments s'entrechoquaient plus souvent dans la «bouillie», par exemple dans une zone plus mobile, alors ils s'arrondissaient à la manière de galets ordinaires au cours d'un transport fluviatile; ainsi s'explique la convergence

remarquable que les cornieules peuvent présenter avec les conglomérats ordinaires. Quant au ciment, son origine est essentiellement chimique, par précipitation du calcaire dissous dans l'eau qui imprègne la «bouillie»[9]). Le ciment de la cornieule correspond donc au remplissage d'une fissure d'extension, et non à une zone de matière broyée comme dans les brèches tectoniques ordinaires (brèches de friction). L'action chimique des eaux interstitielles peut dans certains cas affecter les fragments, qui subissent alors une calcitisation plus ou moins poussée (cf. LEINE 1968, p. 23 et 65).

Finalement, nous avons noté qu'au sein de la «bouillie» la pression fluide peut devenir prédominante. La roche se voit alors soumise à une contrainte plus ou moins uniforme, ce qui explique la forme approximativement isométrique des fragments et leur distribution non orientée, traits assez caractéristiques de beaucoup de cornieules[10]).

En bref, nous pensons avoir montré qu'*un mécanisme de bréchification sous forte pression fluide explique le curieux mélange de caractères sédimentaires et tectoniques offert par la cornieule.*

IV. Brèches tectoniques et pression fluide

En guise de conclusion, voici quelques remarques plus générales sur les brèches tectoniques et autres formes de mylonites (sensu lato). Ces roches proviennent de la fragmentation, à divers degrés de finesse, des roches préexistantes sous l'effet des contraintes accompagnant les mouvements tectoniques. Or les considérations précédentes nous montrent qu'il importe de distinguer deux cas: celui où la fragmentation se produit «à sec» (sous faible pression d'eau), et celui où une forte pression fluide règne le long de la zone de dislocation.

A. Dans le premier cas, la friction agissant entre les deux blocs en mouvement relatif a pour effet: 1. d'une part, sur le plan tectonique, s'il s'agit d'un chevauchement, une sérieuse limitation de la taille du bloc charrié (c'est le paradoxe bien connu de SMOLUCHOWSKI 1909); 2. d'autre part, sur le plan pétrographique, l'écrasement et le broyage des roches le long de la surface de glissement; ainsi prennent naissance les types ordinaires de brèches tectoniques et de mylonites. La dissipation de l'énergie mécanique en chaleur par l'effet de cette friction est parfois assez considérable et assez rapide pour provoquer la fusion locale des roches mylonitisées, ce qui engendre un verre naturel simulant les verres volcaniques (pseudotachylite).

---

[9]) On comprend ainsi l'analogie trompeuse que peuvent présenter avec la cornieule des tufs calcaires emprisonnant des galets torrentiels ou des fragments éboulés. Cette analogie, parfois source de confusions, a aussi mené certains auteurs à parler de «cornieules récentes» (ELLENBERGER 1958, p. 209) ou de «cornieules de remaniement quaternaire» (AMBERGER 1960). On voit maintenant que cette convergence d'aspect n'est pas fortuite, puisque, selon notre explication, le ciment de la cornieule a grosso modo la même origine qu'un tuf.

Comme exemple des confusions que cette analogie peut entraîner, voir le cas discuté par TWERENBOLD (1955, p.18, 103 et 106) et BOTTERON (1967, p. 103).

[10]) Cette idée fut déjà exprimée par JÄCKLI (1941, p. 55): «Verhält sich die Rauhwacke gegenüber tektonischen Bewegungen nicht als fester Körper, sondern wie eine hochviskose Flüssigkeit, bedingt durch ihren hohen Wassergehalt, so wird der einseitig gerichtete Druck der Umgebung in ihr zum allseitig gleichmässig wirkenden hydrostatischen Druck; die Rauhwacke braucht keine bevorzugte Richtung in ihrer Textur zu zeigen.»

B. En revanche une forte pression fluide dans la zone de glissement diminue la friction entre les deux blocs en mouvement. On sait que cette solution du paradoxe de SMOLUCHOWSKI fut proposée par HUBBERT et RUBEY (1959), et développée notamment par HSÜ (1969)[11]; actuellement la pression des fluides apparaît comme un facteur essentiel de la tectonique des nappes. Mais, par le fait même qu'ils réduisent la friction, les fluides sous pression empêchent la bréchification tectonique ordinaire des roches le long de la surface de glissement. D'ailleurs les observateurs avaient été frappés depuis longtemps par la minceur (de l'ordre du mètre ou même moins) de la zone écrasée le long de ces plans de charriage («à couper au couteau») séparant des blocs gigantesques déplacés sur des dizaines de kilomètres. De même, la conversion de l'énergie mécanique en chaleur est très lente, comme le montre l'absence de métamorphisme important (et à plus forte raison de fusion) le long de la surface de glissement.

Pourtant, lorsque le glissement se produit le long d'un niveau dolomitique (chose fréquente dans les nappes préalpines), ce niveau est complètement bréchifié, malgré que la pression fluide fût très élevée, donc la friction très faible; et les brèches ainsi engendrées, les cornieules, présentent des caractères assez paradoxaux pour avoir suscité un siècle de controverses. En outre on retrouve les mêmes cornieules, tout aussi bréchifiées, jalonnant des zones de décollement plutôt potentielles qu'effectives, le long desquelles le déplacement resta très limité. C'est cet ensemble de faits apparemment contradictoires que nous pensons concilier en expliquant la bréchification des cornieules comme un effet non pas tant de la friction (faible) accompagnant le glissement, que de la pression fluide (forte) elle-même. Le mécanisme de la fracturation hydraulique offre une solution à ce problème. On notera que, jusqu'à maintenant, l'existence de pressions fluides anormales à la base des nappes était restée un concept mécanique abstrait, faisant certes figure de nécessité théorique, mais qu'on n'avait pas encore pu justifier «concrètement», sur le terrain, par des observations pétrographiques ou structurales précises. L'élucidation des particularités de la cornieule apporte une telle preuve en révélant des traces visibles des fortes pressions fluides.

On peut finalement remarquer que l'influence de la stratigraphie sur la localisation de la surface de discontinuité tectonique est généralement beaucoup plus marquée en cas de pression fluide forte que faible. Ceci résulte de ce que les propriétés purement mécaniques des roches, qui jouent le rôle essentiel dans la fracturation à sec (résistance, coefficient de friction, etc.), varient relativement peu d'une roche à l'autre (parmi les roches consolidées courantes); la localisation du plan de fracture dépend donc assez peu de la lithologie. Aussi les failles et zones mylonitiques ordinaires montrent-elles souvent une grande indépendance à l'égard de la succession stratigraphique. En revanche, en cas de rupture sous forte pression fluide, ce sont les propriétés hydrauliques des roches (porosité, perméabilité, etc.) qui conditionnent dans une large mesure la localisation de la discontinuité tectonique; or ces propriétés sont étroitement liées à la stratigraphie: assez constantes horizontalement, elles peuvent varier beaucoup d'un niveau à l'autre; la localisation de la discontinuité suivra donc

[11]) On lira aussi les judicieuses remarques d'OULIANOFF (1960) sur le rôle de l'eau sous pression comme «coussinet de protection» diminuant la friction, empêchant ainsi la bréchification des roches et facilitant «le déplacement réciproque des diverses sections, des compartiments de l'écorce et leur avancement sous l'effet des poussées tectoniques».

souvent de très près un horizon stratigraphique (une obliquité manifeste de la discontinuité sur la stratigraphie peut refléter une influence préalable de la tectonique sur les propriétés hydrauliques des roches). Ainsi s'expliquent, comme deux conséquences de la même cause, les deux particularités qui s'associent si souvent pour caractériser les dislocations tectoniques en milieu de forte pression fluide: absence de mylonitisation, et localisation stratigraphique. Le même argument nous a déjà permis d'expliquer la répartition fréquemment concordante des brèches particulières, de type cornieule, qui peuvent se former en ce milieu de faible friction par l'action de l'eau sous forte pression.

En résumé, pour présenter les choses de façon schématique, les effets du mouvement le long des discontinuités tectoniques se ramèneraient aux deux types principaux suivants:

– *Pression fluide faible* («*normale*»): friction forte; généralement peu d'influence de la stratigraphie sur la surface de discontinuité; limitation de l'amplitude des charriages; conversion rapide de l'énergie mécanique en chaleur; importante bréchification tectonique (brèches de friction de type ordinaire), mylonitisation, éventuellement fusion.

– *Pression fluide élevée* («*anormale*»): friction réduite; influence souvent importante de la stratigraphie sur la localisation de la surface de discontinuité; charriage possible sur des dizaines de kilomètres; faible dissipation d'énergie en chaleur; absence ou faible développement de brèches tectoniques ordinaires et de mylonites; si les roches s'y prêtent (p. ex. dolomies), naissance de brèches particulières (cornieules) par fracturation hydraulique.

Ceci posé, il importe naturellement de se rappeler que, dans la nature, la réalité est souvent nuancée. Toutes les transitions sont possibles entre des pressions fluides qualifiables de faibles ou de fortes. De plus la pression, en un endroit donné, a fort bien pu varier au cours du temps, donnant naissance à des dislocations et des brèches de caractère mixte. On peut effectivement observer des transitions entre des cornieules d'aspect typique et des brèches rappelant plutôt des mylonites ordinaires; de telles roches peuvent être difficiles à classer. Dans ce domaine comme dans tant d'autres de la science pétrographique, il convient de laisser la porte ouverte aux superpositions d'effets d'origine multiple et aux évolutions convergentes.

Remerciements

Je tiens à remercier le Prof. Héli Badoux pour avoir bien voulu lire ce texte et me faire part de ses aimables critiques. J'exprime aussi ma reconnaissance à Aymon Baud, qui m'a communiqué ses intéressantes observations et hypothèses nouvelles sur les cornieules des Préalpes médianes; à Jean Norbert, qui m'a fourni de précieux renseignements sur le comportement de la cornieule dans les galeries; et à Marc Weidmann, qui m'a fait profiter des ses utiles commentaires sur plusieurs points traités dans cet article.

BIBLIOGRAPHIE

AMBERGER, G.-F. (1960): *L'autochtone de la partie NW du massif des Aiguilles Rouges (Haute-Savoie et Valais)*. Thèse, Genève:

AMSTUTZ, G.C. (1966): *La symétrie comme critère génétique en géochimie et en gîtologie*. Bull. suisse Min. Petr. *46*, 329–335.

BAUD, A. (1972): *Observations et hypothèses sur la géologie de la partie radicale des Préalpes médianes*. Eclogae geol. Helv. *65*/1.

BONNEY, T.G. (1890): *On the Crystalline Schists and Their Relation to the Mesozoic Rocks in the Lepontine Alps*. Quart. J. Geol. Soc. *46*, 187–240.

BOTTERON, G. (1961): *Etude géologique du Mont d'Or (Préalpes romandes)*. Eclogae geol. Helv. *54*, 29–106.

BRÜCKNER, W. (1941): *Über die Entstehung der Rauhwacken und Zellendolomite*. Eclogae geol. Helv. *34*, 117–134.

BRUNNSCHWEILER, R.O. (1948): *Beiträge zur Kenntnis der Helvetischen Trias östlich des Klausenpasses*. Diss., Zürich.

CAYEUX, L. (1935): *Les roches sédimentaires de France. Roches carbonatées*. Masson, Paris, 447 p.

CHILINGAR, G.V., et TERRY, R.D. (1954): *Relationship between Porosity and Chemical Composition of Carbonate Rocks*. Petroleum Engineer *26*, B 53–54.

CORNELIUS, H.P. (1927): *Über tektonische Breccien, tektonische Rauhwacken und verwandte Erscheinungen*. Centralblatt Min. Geol. Pal., Abt. B, 120–130.

ELLENBERGER, F. (1958): *Etude géologique du pays de Vanoise*, Mém. carte géol. France.

FAVRE, E., et SCHARDT, H. (1887): *Description géologique des Préalpes du canton de Vaud et du Chablais jusqu'à la Dranse et de la chaîne des Dents du Midi*. Mat. carte géol. Suisse *22*.

GENGE, E. (1952): *Einige Beobachtungen an Rauhwackevorkommen der Klippendecke im hintern Diemtigtal (Berner Oberland)*. Eclogae geol. Helv. *45*, 281–284.

– (1958): *Ein Beitrag zur Stratigraphie der südlichen Klippendecke im Gebiet Spillgerten-Seehorn (Berner Oberland)*. Eclogae geol. Helv. *51*, 151–211.

GIGNOUX, M., et BARBIER, R. (1955): *Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques*. Masson, Paris, 343 p.

GRIGGS, D., et HANDIN, J. (1960): *Observations on Fracture and a Hypothesis of Earthquakes*. Geol. Soc. Am. Mem. *79*, 347–364.

HANDIN, J., HAGER, R.V., FRIEDMAN, M., et FEATHER, J.N. (1963): *Experimental Deformation of Sedimentary Rocks under Confining Pressure: Pore Pressure Tests*. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol. *47*, 717–755.

HEARD, H.C., et RUBEY, W.W. (1966): *Tectonic Implications of Gypsum Dehydration*. Geol. Soc. Am. Bull. *77*, 741–760.

HSÜ, K.J. (1969): *Role of Cohesive Strength in the Mechanics of Overthrust Faulting and of Landsliding*. Geol. Soc. Am. Bull. *80*, 927–952.

HUBBERT, M.K., et RUBEY, W.W. (1959): *Role of Fluid Pressure in Mechanics of Overthrust Faulting, I*. Geol. Soc. Am. Bull. *70*, 115–166.

HUBBERT, M.K., et WILLIS, D.G. (1957): *Mechanics of Hydraulic Fracturing*. Trans. Amer. Inst. Min. Met. Petrol. Eng. *210*, 153–166.

JÄCKLI, H. (1941): *Geologische Untersuchungen im nördlichen Westschams (Graubünden)*. Eclogae geol. Helv. *34*, 17–105.

JAEGER, J.C. (1962): *Elasticity, Fracture and Flow*. Methuen, London, 112 p.

– (1963): *Extension Failures in Rocks Subject to Fluid Pressure*. J. Geophys. Res. *68*, 6066–6067.

JEANNET, A. (1913): *Monographie géologique des Tours d'Aï et des régions avoisinantes (Préalpes vaudoises), I*. Mat. carte géol. Suisse [n.s.] *34*.

LANDES, K.K. (1946): *Porosity through Dolomitization*. Bull. Am. Ass. Petr. Geol. *30*, 305–318.

LAUBSCHER, H.P. (1961a): *Die Fernschubhypothese der Jurafaltung*. Eclogae geol. Helv. *54*, 221–282.

– (1961b): *Die Mobilisierung klastischer Massen*. Eclogae geol. Helv. *54*, 283–334.

LEINE, L. (1968): *Rauhwackes in the Betic Cordilleras, Spain*. Thèse, Amsterdam, 112 p.

– (1971): *Rauhwacken und ihre Entstehung*. Geol. Rundschau *60*, 488–524.

MURRAY, R.C. (1960): *Origin of Porosity in Carbonate Rocks*. J. sed. Petr. *30*, 59–84.

NORBERT, J. (1968): *Aménagement hydroélectrique Hongrin-Léman. Problèmes géologiques*. Travaux, Science et Industrie, n° *401*.

OULIANOFF, N. (1960): *Cassures, eau et déplacements des masses rocheuses par les efforts tectoniques*. Intern. Geol. Congr., 21 s. (Norden) *18*, 277–279.

RAAF, M. DE (1934): *La géologie de la nappe du Niesen*. Mat. carte géol. Suisse [n.s.] *68*.

RENEVIER, E. (1891): *Origine et âge du gypse et de la cornieule des Alpes vaudoises*. Eclogae geol. Helv. *2*, 229–247.

ROBINSON, L.H. (1959): *The Effect of Pore and Confining Pressure on the Failure Process in Sedimentary Rock*. Colorado School Mines Quart. *54*/3, 177–199.

RUBEY, W.W., et HUBBERT, M.K. (1959): *Role of Fluid Pressure in Mechanics of Overthrust Faulting, II*. Geol. Soc. Am. Bull. *70*, 167–205.

SCHARDT, H. (1885): *Sur l'origine des cargneules*. Arch. Sci. phys. nat. (3), *14*, 247–251 (et: Actes Soc. helv. Sci. nat., 68 s.).

SECOR, D.T. (1965): *Role of Fluid Pressure in Jointing*. Am. J. Sci. *263*, 633–646.

– (1968): *Mechanics of Natural Extension Fracturing at Depth in the Earth's Crust*. Geol. Surv. Canada Paper *68*/52, 3–47.

SMOLUCHOWSKI, M.S. (1909): *Some Remarks on the Mechanism of Overthrusts*. Geol. Mag. [n.s.] V, *6*, 204–205.

TWERENBOLD, E. (1955): *Les Préalpes entre la Sarine et les Tours d'Aï*. Thèse, Fribourg.

WEIDMANN, M. (1971): *Cargneule ou cornieule?* Eclogae geol. Helv. *64*, 47–51.