Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae

Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft

Band: 69 (1976)

Heft: 2

Artikel: Un sièvle de géologie des Préalpes : de la découverte des nappes à la recherche de leur dynamique

Autor: Masson, Henri

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-164526

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 28.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv.	Vol. 69/2	Pages 527-575	6 figures dans le texte et 1 tableau	Bâle, juillet 1976

Un siècle de géologie des Préalpes: de la découverte des nappes à la recherche de leur dynamique

Par HENRI MASSON[1])

ABSTRACT

This historical review of the geology of the Prealps is centered on the origin and the evolution of the nappe concept.

Chapter II examines briefly the progress of Alpine tectonics in the 19th century, from the first descriptions of folds to the birth of the nappe concept. The latter first appears in the works of BERTRAND on the Helvetic nappes in eastern Switzerland and TÖRNEBOHM on the Scandinavian Caledonides, however the nappe theory really starts in 1893 with SCHARDT's work on the Prealps. In this theory, SCHARDT not only revealed the "exotic" nature of these mountains, but integrated a variety of data, such as the paleogeographical contrast between different units, the klippes, and the difficult problem of the exotic blocks in the flysch formations (III.*A*). SCHARDT's theory first encountered strong opposition, and its general acceptation is largely the result of the work of LUGEON, whose triumph in 1902 ends the "heroic period" of Alpine tectonics (III. *B*).

During the next 40 years, the development of this theory includes the discovery of several new nappes and the controversies on the position of their roots; for some of them the "root problem" has only been solved recently or is still in abeyance (IV. *A* to *D*). With ARGAND's interpretation of the genesis of the Alps through the collision of two continents, the Prealps appear as the result of the expulsion of sedimentary covers out of the compressed troughs (IV. *E*).

In 1940, this picture was completed by the introduction of gravity tectonics due to the detailed work of LUGEON & GAGNEBIN (V. *A* and *B*); it was soon followed by the discovery of the mechanism of diverticulation (LUGEON and BADOUX), that proved to be a powerful tool in the understanding of the emplacement of complex nappes (V. *C*). Chapter VI reviews modern trends with emphasis on the problems of the dynamics of nappes emplacement.

TABLE DES MATIÈRES

I. Introduction 528
II. La géologie des Préalpes avant 1893 529
A. Stratigraphie et paléogéographie. Le problème des blocs exotiques 529
B. Tectonique. De la découverte des plis à celle des nappes 530
III. 1893-1902: la découverte des nappes préalpines et la «période héroïque» 535
A. La découverte de SCHARDT 535
B. 1893-1902: dix ans de lutte pour le triomphe d'une théorie 542
IV. 1902-1940: l'application de la théorie des nappes et le problème des racines 548
A. Introduction 548
B. Les nouvelles nappes 549
C. Origine de l'Ultrahelvétique 551
D. Origine des Médianes et de la Brèche 551
E. Les Préalpes, couvertures chassées par la collision des continents 556

[1]) Institut de Géologie, Palais de Rumine. CH-1005 Lausanne (Suisse).

V. 1940–1946: la tectonique de gravité et la diverticulation 558
A. Considérations historiques 558
B. Le glissement gravitatif des nappes préalpines 560
C. La diverticulation 564
VI. Tendances récentes et vues d'avenir 567
Bibliographie 570

I. Introduction

L'apport d'un travail géologique comporte deux aspects. Premièrement un aspect régional, essentiellement descriptif; c'est la somme des informations nouvelles sur un secteur déterminé de la croûte terrestre, obtenues généralement grâce à des méthodes et des concepts déjà éprouvés ailleurs. Puis un aspect théorique, ou mieux conceptuel: il s'agit de tirer des faits observés les lois qui régissent les phénomènes naturels en action dans la Terre. Il est dans l'esprit de la Science de tendre à passer du niveau descriptif au niveau conceptuel; aussi le respect des savants s'attache-t-il avec une ferveur particulière au travail de celui qui, partant des informations glanées dans une région, est parvenu à en déduire un concept nouveau, surtout si ce concept améliore assez notre compréhension des lois naturelles pour qu'on puisse l'appliquer avec succès à l'élucidation de faits acquis dans d'autres régions.

A deux reprises pendant les cent dernières années, les Préalpes fournirent les éléments d'une telle «percée» conceptuelle, et furent le berceau d'une théorie qui secoua la géologie bien au delà des montagnes qu'elle prétendait expliquer. Aussi désirons-nous, en ouvrant ce colloque sur la Géologie des Préalpes, jeter un regard sur l'œuvre de nos devanciers et sur l'héritage essentiel qu'ils nous ont légué.

La première de ces grandes découvertes est évidemment celle des *nappes.* Elle fut principalement l'œuvre d'un homme, HANS SCHARDT, en 1893. L'histoire et les circonstances de cette découverte capitale étant communément méconnues, il vaut la peine de conter ces événements avec quelque détail.

Un demi-siècle plus tard, les Préalpes furent un haut-lieu de l'élaboration d'une contribution importante à la connaissance de la dynamique des nappes: la *tectonique de gravité,* et certaines de ses conséquences, notamment la théorie de la *diverticulation.* Nous manquons peut-être encore de recul pour évaluer avec toute la sérénité souhaitable ces découvertes plus récentes, dont certains implications sont toujours au centre des recherches et des controverses actuelles; néanmoins nous essayerons d'en résumer l'histoire en toute objectivité et d'en dégager les lignes de force.

Mais nous devons d'abord nous replacer dans l'esprit de la fin du siècle dernier. Nous commencerons donc par rappeler brièvement quel était l'état de la géologie, et plus particulièrement de la tectonique, au moment où SCHARDT conçut sa découverte.

Aucune carte n'accompagnant ce texte, nous conseillons au lecteur peu familier avec la géologie des Alpes de se repérer (particulièrement en lisant le chapitre IV) sur la récente «Carte tectonique de la Suisse» au 1:500000 (1972). Il pourra aussi se référer à la coupe tectonique des Préalpes de l'article de TRÜMPY (1960).

II. La géologie des Préalpes avant 1893

A. Stratigraphie et paléogéographie. Le problème des blocs exotiques

La géologie, en tant que corps de doctrines plus ou moins cohérentes tirées de l'observation de la nature, avait pris naissance au cours de la deuxième moitié du 18e siècle. Après un départ hésitant, durant lequel les pionniers de la description des faits naturels durent engager un combat difficile contre des mythes tenaces, notre science connut dès 1800 un développement réjouissant, et, à la fin du 19e siècle certaines de ses branches étaient déjà fort avancées.

C'était particulièrement le cas de la paléontologie stratigraphique, dont les progrès avaient été rapides: au tiers du 19e siècle, les «époques» de BUFFON (1778) avaient cédé la place à une classification méthodique des terrains fossilifères en 9 groupes bien caractérisés par leur faune (DE LA BECHE 1832); en 1849, D'ORBIGNY reconnaissait déjà 28 étages, et 25 ans plus tard, le «Tableau des terrains sédimentaires» de RENEVIER (1873/74) ne distingue pas moins de 79 étages définis par leurs fossiles.

Cette science fut naturellement appliquée aux Préalpes, pour lesquelles le 19e siècle restera celui du grand défrichage stratigraphique. Ce fut l'œuvre de BRUNNER (1857), COLOMB (1850), A. FAVRE (1859, 1867), E. FAVRE (1870, 1875, etc.), FAVRE & SCHARDT (1887), FISCHER-OOSTER (1865, 1869, etc.), GILLIÉRON (1873, 1885 avec un historique détaillé), DE LORIOL & SCHARDT (1883), DE MORTILLET (1858), OOSTER (1869, etc.), PICTET et al. (1858), QUENSTEDT (1838), RENEVIER (1854, 1864), STUDER (1834, 1853), et bien d'autres. Si bien qu'en 1890, grâce aux efforts persévérants de ces savants, tous les terrains importants des Préalpes étaient datés à la satisfaction générale au niveau de l'époque et souvent de l'étage, sauf trois, particulièrement pauvres en fossiles: les dolomies et gypses du Trias, les brèches du Chablais et de la Hornfluh, et les flysch. On verra que l'attribution définitive d'un âge triasique au gypse, et jurassique à la brèche du Chablais, en 1890–93, joua un rôle décisif dans la conception de la théorie des nappes; quant aux flysch, leur datation devait attendre le développement de la micropaléontologie.

Les stratigraphes du 19e siècle avaient appris non seulement à dater les terrains, mais aussi à reconnaître les conditions paléogéographiques de leur formation. Mer profonde ou littorale, île émergée ou lagune saumâtre, récif corallien ou delta, étaient autant de milieux dont les contemporains de SCHARDT savaient déchiffrer l'existence passée. Or, dans les Préalpes, ces recherches débouchaient sur plusieurs problèmes déroutants.

D'abord, la juxtaposition brutale, et parfois l'interpénétration, de roches de même âge mais de faciès complètement différent, menaient à des reconstitutions paléogéographiques peu cohérentes. Ensuite, on découvrait dans les flysch du versant N des Alpes des blocs, parfois énormes, de roches inconnues à l'affleurement dans ces régions de faciès helvétique; leur provenance était donc mystérieuse, de même que celle de nombreux galets des conglomérats de la molasse du Plateau suisse. C'est à ces blocs énigmatiques, qui semblaient totalement étrangers à leur entourage, que BACHMANN (1863) appliqua le terme aujourd'hui consacré de *blocs exotiques.* Leur origine fut l'une des questions de géologie alpine les plus discutées pendant le 19e siècle.

Pour tenter d'y répondre, STUDER (1834, 1853) avait émis l'hypothèse, fort remarquable pour l'époque, d'une ancienne chaîne de montagnes sur la bordure N des Alpes; l'érosion de cette chaîne marginale aurait alimenté la sédimentation du flysch et de la molasse. Les Préalpes, dans lesquelles on trouve des terrains de faciès semblable à certains blocs exotiques, étaient interprétées comme un reste de ces anciennes montagnes, ailleurs enfouies sous leurs propres détritus et sous les plis helvétiques déversés vers le N. Cette interprétation prévalut jusqu'en 1890.

Lorsque fut reconnue la parenté d'une partie de ces blocs et galets avec des roches du versant S des Alpes, les géologues se virent confrontés au problème de leur transport vers le N. On invoqua un charriage de ces matériaux par des glaces flottantes (SCHARDT 1884, RENEVIER 1890) ou par des fleuves originaires des Alpes orientales et méridionales (FRÜH 1888, SARASIN 1894); mais aucune de ces explications n'apparaissait satisfaisante. Aussi la SHSN mit-elle au concours, en 1889, pour l'attribution d'un prix, le problème de l'origine des blocs exotiques. Dans une réponse restée inédite (1890), SCHARDT abandonne l'idée du transport glaciaire, et, tout en restant dans le cadre de l'hypothèse de STUDER, cherche à expliquer l'origine de ces blocs par des mécanismes sédimentaires liés à l'activité de failles chevauchantes pendant le soulèvement des Préalpes; c'était un pas dans la bonne direction. Enfin la solution apparut lorsque, en 1893, le même SCHARDT imagina qu'un *charriage tectonique* de 60 à 100 km, voire plus, avait amené massivement des roches de la bordure S des Alpes sur leur versant N. On voit que ces problèmes de paléogéographie et de transport du matériel exotique sont au cœur des recherches qui débouchèrent en 1893 sur la théorie des nappes.

B. Tectonique. De la découverte des plis à celle des nappes

Comparativement, la tectonique n'était pas aussi avancée.

Certes la notion de *déformation* des roches était déjà solidement établie. On doit à DE SAUSSURE (1779–96) d'avoir compris, après de prudentes hésitations, que les *plis* résultent de l'incurvation de strates originellement planes et horizontales sous l'effet des forces souterraines qui créèrent les montagnes; c'est la naissance du concept de déformation tectonique. Ses meilleurs exemples provenaient des nappes helvétiques dans les vallées de l'Arve, de l'Aare et de la Reuss.

Des plis avaient naturellement été déjà observés et figurés par des naturalistes plus anciens. Ainsi SCHEUCHZER (1716) donne une illustration remarquable des plis des nappes helvétiques dans la vallée de la Reuss. C'est aussi chez SCHEUCHZER (p. 115) que le mot *architectonique,* plus tard abrégé en tectonique, apparaît semble-t-il pour la première fois avec son sens moderne relatif à la structure interne des montagnes. Mais SCHEUCHZER préfère expliquer leur genèse par l'action d'une force miraculeuse divine («einer Göttlichen Wunderkraft»), pendant le Déluge, plutôt que par des forces naturelles: au plan des idées, on est encore nettement dans la préhistoire de la science géologique.

La notion de plissement des roches était extrêmement hardie pour l'époque, tant elle est contraire au «bon sens» pour lequel roche = solide = indéformable. Aussi n'est-ce qu'après de nombreuses observations et de sérieuses réflexions que DE SAUSSURE adopte définitivement cette explication des couches «froissées et contournées». Dans les comptes rendus de ses premiers voyages, il l'oppose à l'idée d'une cristallisation originelle des roches dans leur position actuelle, à laquelle il donne d'abord sa préférence. En choisissant des citations tirées de cette période initiale de prudentes hésitations, HÖLDER (1960), dans un ouvrage par ailleurs bien documenté sur l'histoire de la géologie, présente DE SAUSSURE comme l'apôtre de cette théorie de la cristallisation des montagnes. En réalité, l'important est justement de voir DE SAUSSURE, dès le premier tome de son œuvre, se dégager progressivement de cette conception

primitive pour admettre et promouvoir la notion de plissement des couches par l'effet d'un «refoulement», c'est-à-dire d'une compression horizontale.

A la même époque, DE RAZOUMOWSKY (1784) signale des plis dans les Préalpes le long de la vallée du Rhône. Etonné par les contournements bizarres des couches, il cherche à expliquer leur origine par «la pression de quelques corps plus pesans qu'elles, lorsqu'elles étaient encore molles». Moins précis que DE SAUSSURE dans la description des plis, et moins pénétrant dans la compréhension de leur relation avec la formation des montagnes, DE RAZOUMOWSKY frappe cependant par des réflexions qui font de lui aussi bien un précurseur de la tectonique de gravité, que l'un des premiers à avoir posé clairement le problème du raccourcissement horizontal des zones plissées:

«Cette forme bizarre paroît d'abord inexplicable, et l'on a de la peine à concevoir quelle est la cause qui a produit un si singulier effet; mais en supposant différents degrés de densité dans les différentes parties des montagnes, et la pression de couches ou matières plus denses et plus pesantes, ... il me paroît que la pression de ces matières ... a pu ... produire différents effets sur les couches des montagnes, soit en les courbant, ... soit en les redressant. Quoi qu'il en soit, il est évident que la côte dont nous parlons, a dû autrefois avoir une étendue beaucoup plus considérable qu'aujourd'hui en longueur, puisque les couches repliées ou presque perpendiculaires maintenant, paroissent avoir été horizontales autrefois» (1784, p. 4–5).

A la suite de ces auteurs, les descriptions de plis se multiplièrent dans les Alpes, le Jura, etc., menant rapidement les géologues à constater que le plissement des couches est un trait caractéristique des chaînes de montagnes. S'en suivirent de longues discussions sur la primauté des forces verticales (VON BUCH, STUDER, etc.), ou horizontales (appelées *refoulements*; DE SAUSSURE[2]), ELIE DE BEAUMONT, HEIM, SUESS, BERTRAND, etc.), dans la genèse des montagnes et leurs plis; ces discussions durent toujours à l'heure où nous écrivons ces lignes (sous une forme renouvelée, il est vrai!). Avant 1890, les Préalpes ne semblent pas avoir joué un rôle de premier plan dans ces controverses tectoniques. En fait, on est frappé par le caractère extrêmement schématique et sommaire des descriptions des plis, même chez des auteurs dont les reconstitutions stratigraphiques atteignaient un haut degré de précision; font exception les ouvrages de GILLIÉRON (1873) et surtout FAVRE & SCHARDT (1887), qui contiennent des représentations souvent précises de plis assez compliqués.

Dès le milieu du 19e siècle, des géologues anglais abordent l'étude de la structure intime des roches déformées: schistosité, petits plis, fossiles étirés, sont examinés en détail. Ces méthodes sont introduites dans les Alpes par RENEVIER (1856), et développées surtout par ALBERT HEIM dans son magistral «Mechanismus der Gebirgsbildung» (1878), ouvrage qui constitue le sommet de la tectonique avant la découverte des nappes. Non seulement HEIM énonce des observations précises, codifiées en 16 lois, sur les objets déformés et leurs structures, mais il en déduit des considérations mécaniques sur la plasticité des roches qui étaient très en avance sur les possibilités expérimentales de l'époque. Ainsi, de DE SAUSSURE (1779) à HEIM

---

[2]) «Or, un déplacement de ce genre, n'a pu être produit que par deux moyens, ou par une force agissant de bas en haut, qui ait rejeté la partie gauche de la montagne sur la partie droite, ou par un refoulement qui ait replié l'une par-dessus l'autre. Or, l'hypothèse du refoulement me paraît beaucoup plus probable ...» (DE SAUSSURE 1796, IV, p. 114–115).

(1878), un siècle de tectonique établit fermement les bases de l'étude de la déformation des roches dans les montagnes; manquait un concept essentiel: celui des grandes *translations.*

La mesure d'une translation est relative au choix d'un référentiel. En pratique, on prend généralement comme référentiel fixe un substratum [original ou actuel (!), fig. 1] par rapport auquel la translation apparaît surtout évidente si elle a causé un recouvrement stratigraphiquement anormal; alors que si la série mobile se substitue à une série érodée ou décollée de même contenu stratigraphique, la translation peut être difficile à déceler (substitution de couverture, ELLENBERGER 1958*b*). On comprend pourquoi, historiquement, la reconnaissance des grandes translations est liée à celle des recouvrements anormaux.

Des *recouvrements anormaux* furent détectés tôt dans le 19e siècle; mais, sauf les exceptions que nous allons citer, il ne s'agissait que de petits chevauchements

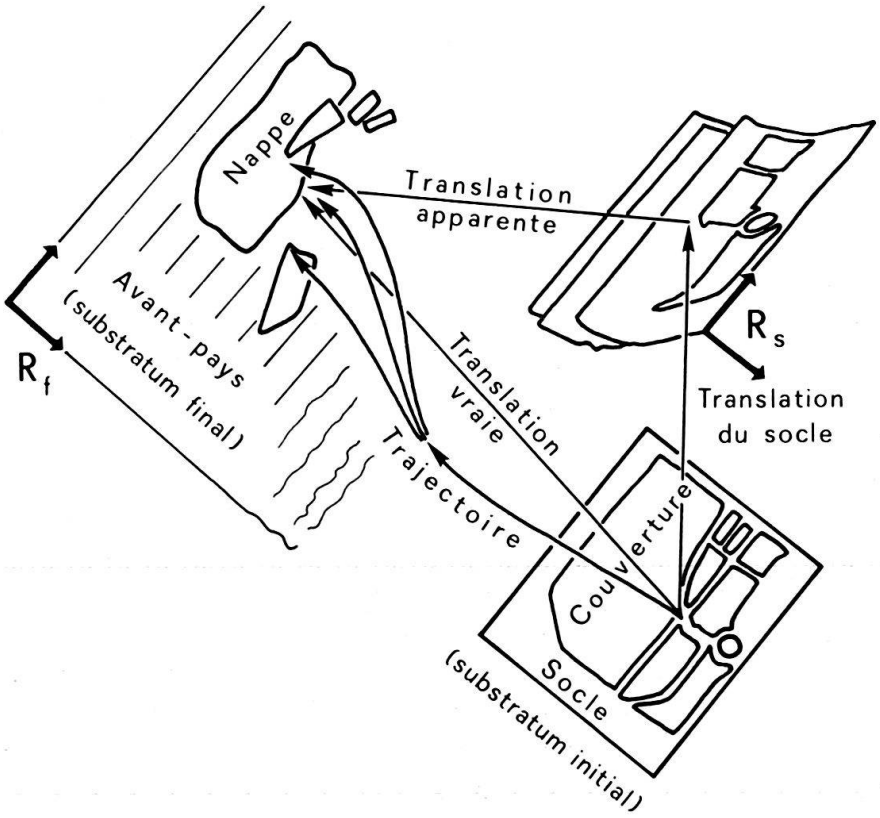


Fig. 1. La mesure d'une translation est relative au choix arbitraire du référentiel.

La mesure la plus proche de ce qu'on ressent intuitivement comme la «translation vraie» d'une nappe est celle faite dans le référentiel R_f lié à l'avant-pays plus ou moins stable. Mais le substratum initial (la patrie) de la nappe a généralement aussi subi une translation dans R_f; c'est pourquoi la distance entre une nappe et la position actuelle de sa patrie (soit la translation mesurée dans le référentiel R_s lié à ce substratum) ne représente qu'une «translation apparente», habituellement inférieure à la translation vraie. C'est par cette translation apparente qu'on chiffre ordinairement le parcours d'une nappe; elle est connue lorsqu'on a identifié la patrie de la nappe, p.ex. à l'aide des reliques de couverture restées solidaires du socle (cf. chap. IV: «problème des racines»). La détermination de la translation vraie est beaucoup plus difficile; elle implique notamment la mesure de la déformation des séries translatées et l'interpolation des intervalles subduits.

secondaires, ou de petites portions de grands chevauchements qui n'étaient reconnus comme tels que sur une distance ne dépassant guère 1 km. Ainsi, dans les Préalpes du Chablais, A. FAVRE (1849 et 1859) recense plusieurs cas d'«arrangements bizarres» des couches, qui amènent des roches jurassiques ou crétacées au-dessus du Tertiaire. Devant la klippe des Annes, il constate «la superposition de grandes masses calcaires contenant des bélemnites et des ammonites à des roches remplies de nummulites»; il en déduit que la position des couches est anormale, et se demande s'il n'a pas découvert ainsi une «des exceptions dans la science qui deviennent des règles générales pour les Alpes?» (FAVRE 1849). Il conclut à la nécessité d'une étude minutieuse des Alpes, pour «rapporter aux lois connues et immuables, les phénomènes qui ont déterminé les bizarres arrangements que je viens de signaler» (1859).

Cependant on découvrit bientôt, dans les Alpes helvétiques et dans les chaînes paléozoïques du N de l'Europe, plusieurs exemples de recouvrements anormaux beaucoup plus spectaculaires, d'une amplitude allant parfois jusqu'à 15 km. Les plus remarquables étaient, tout d'abord, le célèbre chevauchement glaronnais (ESCHER 1841, MURCHISON 1849, HEIM 1878), qui, avec les 15 km que lui reconnaissait HEIM, faisait figure de géant; le pli couché de Morcles, reconnu par RENEVIER (1877) sur plus de 6 km; les chevauchements du bassin houiller franco-belge, également d'une amplitude reconnue de 6 km (GOSSELET 1879); enfin le fameux «Moine thrust» de l'Ecosse, évalué à au moins 16 km (PEACH & HORNE 1884, GEIKIE 1884). On voyait dans ces chevauchements des fantaisies exceptionnelles et monstrueuses de la nature, et toutes les interprétations cherchaient à en minimiser l'ampleur à l'aide de divers artifices tels que des plis à double déversement («Doppelfalten», soit des anticlinaux en éventail ou même en champignon, et des synclinaux en blague-à-tabac; p. ex. HEIM 1878, pour le chevauchement glaronnais). «La notion de recouvrement existe déjà. On en use avec des vues limitées et désordonnées» (FALLOT 1954).

Il appartint à MARCEL BERTRAND (1884) de proposer, le premier, de substituer au «Doppelfalte» des Alpes glaronnaises un chevauchement unique vers le N, d'une amplitude de 40 km. Les figures célèbres d'ALB. HEIM (1908, fig. 4), souvent reproduites, illustrent bien l'ancienne et la nouvelle conception. Ainsi fut découverte la première *nappe,* dans l'Helvétique de Suisse orientale. Découverte d'autant plus brillante que BERTRAND n'avait jamais visité les lieux et basait son interprétation révolutionnaire sur les seules descriptions de HEIM, ce qui est d'ailleurs un hommage aux talents d'observateur et de dessinateur du grand géologue zurichois. Hélas le travail de BERTRAND, trop hardi pour l'époque, tomba dans l'incrédulité générale. «Wir schüttelten ungläubig den Kopf», avoua plus tard HEIM (1908), et nul ne voulut perdre son temps ou risquer sa réputation à discuter, même pour la contredire, une conception aussi téméraire.

Ainsi pendant 8 ans aucun géologue alpin n'exploita les immenses possibilités nouvelles qui s'ouvraient, sauf BERTRAND lui-même. Dans ses travaux sur les montagnes de Provence, il montra que leurs «îlots» triasiques ou jurassiques étaient des reliques de plis couchés, et non, comme on l'avait cru, des écueils dans la mer crétacée; c'est à cette occasion que le mot *nappe* est utilisé pour la première fois dans son sens tectonique moderne de corps allochtone de grande dimension (BERTRAND

1889, p. 239). Un vivant portrait de l'œuvre et de la personnalité exceptionnelles de MARCEL BERTRAND (1847–1907) se trouve dans le livre de BAILEY (1935); cet ouvrage contient aussi d'intéressants renseignements sur les débuts de la théorie des nappes dans les Alpes, et en particulier (p. 78–83) une analyse très fine des relations scientifiques entre BERTRAND et SCHARDT et de l'originalité de leurs découvertes respectives. Il nous suffit d'y renvoyer le lecteur, en ajoutant que nos propres recherches confirment entièrement les conclusions très équilibrées de BAILEY.

A la même époque, TÖRNEBOHM (1888) mit en évidence les énormes chevauchements, d'au moins 100 km, des Calédonides de Scandinavie. Comme celle de BERTRAND, la découverte du grand géologue scandinave, trop en avance sur son temps, semble avoir dépassé la capacité d'assimilation de ses contemporains, et son influence directe fut minime.

Aussi la théorie des nappes ne prit-elle son véritable départ que quelques années plus tard, dans les Préalpes, grâce aux travaux extrêmement remarquables de SCHARDT, bientôt secondé par LUGEON. Et ce n'est pas diminuer les mérites des précurseurs que de constater que la découverte de SCHARDT est beaucoup plus qu'une simple réédition des leurs dans un autre lieu. Car l'œuvre de SCHARDT ne se limitait pas à mettre en évidence des chevauchements, mais embrassait et révolutionnait pratiquement toute la gamme des phénomènes géologiques alors connus dans les Alpes. Nous revenons ainsi aux Préalpes, dont nous nous étions provisoirement écartés pour mieux suivre les progrès de la tectonique au 19e siècle. Car maintenant, en 1893, les Préalpes vont véritablement entrer dans l'histoire de la géologie.

En conclusion, à l'heure où la découverte des nappes va éclater dans les Préalpes, une multitude de données avaient déjà été accumulées sur la géologie de ces montagnes, tant sur le plan stratigraphique que structural. Pourtant aucune théorie ne paraissait pouvoir intégrer ces données variées en un tout cohérent. Au contraire, l'impression qui se dégage des Préalpes telles qu'on les connaissait au début de 1893 est celle d'un *chaos:* chaos tectonique d'abord, avec la multiplication forcée des plis en champignon pour expliquer les recouvrements anormaux avec une translation minimale; chaos paléogéographique ensuite, car la juxtaposition et l'interpénétration de terrains contemporains de faciès très différents menait à un invraisemblable réseau de sillons bathyaux découpant des plateformes côtières et de récifs jaillissant des mers profondes.

Tableau: *Translations horizontales maximales estimées possibles à la surface de la terre.*

Amplitude de la translation:	Auteur et date:
15 km	(ESCHER 1841) HEIM 1878
40 km	BERTRAND 1884
~100 km	TÖRNEBOHM 1888 SCHARDT 1893 LUGEON 1902
1000–10000 km	WEGENER 1915 ARGAND 1924

III. 1893–1902: la découverte des nappes préalpines et la «période héroïque»

A. La découverte de SCHARDT

Curieuse destinée que celle de HANS SCHARDT (1858–1931), qui, né à Bâle, étudia la pharmacie à Lausanne et Genève avant d'entreprendre une carrière géologique exceptionnellement féconde (J. FAVRE 1932, LEUBA 1932). Peu satisfait de son premier métier et passionné de recherche, il s'en alla enseigner les sciences naturelles au collège de Montreux, petite ville bien située comme base d'excursions géologiques dans les Alpes. Plus tard il professa à l'Université de Lausanne comme privat-docent, puis, quand vint la célébrité, fut nommé professeur à Neuchâtel et enfin à Zürich.

Lorsque SCHARDT conçut sa découverte en 1893, il avait déjà consacré aux Préalpes une quinzaine de publications, certaines très brèves, d'autres beaucoup plus importantes comme le gros ouvrage de 1887 en collaboration avec E. FAVRE (sans parler de nombreuses notes sur la géologie du Jura, des glissements de terrain, etc.). Toute son œuvre se caractérise d'une part par la précision de l'observation, d'autre part par un sens aigu des structures[3]). Cette qualité sera déterminante dans la conception de la théorie des nappes.

En effet, SCHARDT était en conflit avec RENEVIER sur l'âge de certains terrains pauvres en fossiles, particulièrement la brèche du Chablais et de la Hornfluh. Comme cette brèche recouvre toujours des formations crétacées ou tertiaires, et que tous les artifices par lesquels on aurait cherché à l'enraciner sous ces formations étaient en contradiction avec ses observations structurales, SCHARDT (1884) en déduisait qu'elle était plus jeune, donc tertiaire. RENEVIER, fin stratigraphe, soutenait au contraire l'âge jurassique de la brèche, ce qui était correct, mais impliquait alors «logiquement» de la faire monter des profondeurs par des plis étranglés «en champignon», ce dont SCHARDT était à juste titre convaincu de la fausseté. Une controverse analogue opposait les deux savants sur l'âge de certaines dolomies et gypses triasiques, également dépourvus de fossiles et souvent superposés à des flysch crétacés ou tertiaires. La géologie des Préalpes se trouvait donc devant un *paradoxe*, résultant d'une apparente contradiction entre le point de vue stratigraphique et le point de vue structural. L'histoire de la Science connaît d'autres exemples de telles «impasses» et montre qu'elles annoncent souvent une grande découverte, c'est-à-dire l'apparition d'un *concept nouveau* qui résoud la contradiction tout en donnant raison à chacun sur ses arguments.

C'est ce qui arriva dans les Préalpes: en 1893, SCHARDT, convaincu par les derniers travaux de RENEVIER et son élève LUGEON que la brèche était bien jurassique, révisa son opinion stratigraphique tout en maintenant son opinion structurale. Le concept nouveau était celui de *nappe*, qui renaquit ainsi dans les Préalpes 9 ans après le travail de BERTRAND, cette fois pour prendre un envol définitif.

---

[3]) Le goût de SCHARDT pour la géologie structurale se révèle aussi dans les expériences qu'il entreprit sur des modèles en argile pour reproduire en laboratoire les principaux types de dislocations observées dans les montagnes (1884). Ces recherches font également de SCHARDT un pionnier de la tectonique expérimentale.

En créant cette théorie, SCHARDT ne visait pas seulement à expliquer la structure de quelques montagnes. Il avait conscience qu'il jetait les bases d'une conception synthétique et fondamentalement nouvelle de la chaîne alpine, qui ouvrait la voie à la solution simultanée d'une série d'énigmes de nature très diverse: le mystère des blocs exotiques, l'alimentation des flysch et de la molasse, la similitude entre les terrains des bordures interne et externe des Préalpes, le contraste stratigraphique et tectonique entre les Préalpes et leur entourage, le désordre apparent des enchaînements paléogéographiques, l'énigme des klippes de Suisse centrale et de Savoie, etc.:

«Tout cela ne me paraissait former ... qu'un seul et même problème, se rattachant intimement au développement tectonique du versant N des Alpes (1898, p. 150) ... *Tout cela n'a été pour moi qu'un seul jet d'idées,* d'autant plus claires et nettes, que *l'enchaînement des phénomènes qu'il faut supposer est d'une simplicité surprenante»* (p. 156).

Sitôt conçue, SCHARDT publia sa théorie sous une forme relativement concise (1893), trop brève pour entrer dans les détails, mais cependant assez précise pour émouvoir le monde géologique et soulever une vague de violentes critiques. Il attendit plusieurs années sous l'orage avant d'écrire des justifications plus détaillées. La plus complète parut en 1898 au Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles; cet article, certainement l'un des plus importants de toute la littérature géologique par sa richesse en idées nouvelles et par les profondes remises en question qu'il annonçait, contient une démonstration détaillée qui englobe tous les aspects stratigraphiques, paléogéographiques et tectoniques du problème. Par commodité, nous grouperons ici les découvertes de SCHARDT en huit paragraphes.

1. Allochtonie des Préalpes

SCHARDT affirme l'*exotisme* des Préalpes. Ce mot, qui figure dans le titre de l'article de 1898, est à lui seul un symbole et un programme. D'une part SCHARDT s'était déjà convaincu depuis plusieurs années que, d'une manière ou d'une autre, la solution de l'énigme des blocs exotiques était étroitement liée à celle du problème posé par l'existence même des Préalpes. D'autre part, ce terme appliqué à l'ensemble des Préalpes exprime de la manière la plus provoquante que ces montagnes *n'ont rien à faire là où elles se trouvent,* qu'elles sont *étrangères à leur entourage,* et que, fondamentalement, seule leur dimension les distingue des blocs exotiques dispersés dans les flysch.

«Toute notre région du Stockhorn-Chablais, malgré son étendue de plus de 115 kilomètres, n'est-elle pas, par rapport à son entourage à faciès helvétique, autre chose qu'une *immense klippe,* une *nappe exotique*? Elle ne diffère des klippes que par ses dimensions; comme elles, c'est *un morceau de terre étrangère jeté sur la limite des Alpes et du Plateau miocène,* sans racine ou assise normale en profondeur» (1889, p. 17).

Parmi les principaux arguments de SCHARDT, notons:

— Le contraste brutal des faciès aux limites des Préalpes (vallée de l'Arve au SW, zone des cols au SE, lac de Thun au NE). Contrairement à certains de ses contradicteurs qui prétendaient voir des passages graduels (p. ex. HAUG 1899), SCHARDT insiste sur l'absence de transitions, du Trias au Tertiaire, et souligne l'absurdité d'une paléogéographie basée sur les positions actuelles des provinces de faciès.

— Le contact constamment chevauchant des Préalpes sur leur entourage. Dès 1892, SCHARDT avait mis en évidence le chevauchement du bord externe des Préalpes sur la molasse, avec un rejet visible de 10 à 15 km dans la vallée du Rhône. En 1893, il généralise ces observations dans ce qu'il appellera plus tard la «Loi des Préalpes»: les Préalpes reposent partout sur un substratum plus jeune, ordinairement du tertiaire (flysch ou molasse).

— Au contraste stratigraphique entre l'Helvétique et les Préalpes s'ajoute un contraste de style tectonique. SCHARDT en déduit que les plis helvétiques, «lacets couchés toujours vers le N, presque sans rupture, ni failles, mais accusant une lamination énorme des couches», se sont formés sous une pression plus forte que ceux des Préalpes (1899, p. 19). De plus, aux limites SW et NE, les plis helvétiques plongent «très ostensiblement» sous les Préalpes.

En conclusion:

«La zone du Chablais paraît comme encastrée dans la bordure nord des Alpes à faciès helvétique ... Elle forme une pièce indépendante, étrangère à tout ce que renferme la bordure calcaire du versant N des Alpes»; et, après avoir réfuté diverses autres explications, SCHARDT (1893) conclut *«qu'il est encore bien plus simple de considérer toute la région du Chablais et du Stockhorn, de la vallée de l'Arve jusqu'à celle de l'Aare, comme une nappe de recouvrement venue du Sud, par-dessus la zone des Dents du Midi et du Mont-Blanc-Finsteraarhorn»*.

2. *Découverte de plusieurs nappes*

Démontrer l'allochtonie des Préalpes en bloc était une grande découverte, mais SCHARDT ne se contente pas de découvrir une nappe. Il en découvre trois (fig. 2):

I. Une nappe principale forme le gros des Préalpes, appelé *Préalpes médianes* depuis LUGEON (1896).

II. SCHARDT montre que les brèches du Chablais-Hornfluh, dont LUGEON venait d'établir définitivement l'âge jurassique, présentent par rapport au gros des Préalpes le même type de relation que celles-ci par rapport à leur entourage helvétique; elles constituent donc une deuxième nappe, dite *de la Brèche*, superposée à la nappe principale.

III. Entre le plan de charriage des Préalpes médianes et le Tertiaire autochtone s'insère une zone discontinue de flysch emballant de grandes lames de terrains mésozoïques, qui affleurent de part et d'autre des Médianes sur les deux bords interne (zone des cols) et externe des Préalpes: cette «traînée de lambeaux» constitue une troisième nappe à la base de l'édifice préalpin (nommée *ultrahelvétique* par ARN. HEIM 1920). En postulant cette liaison (au moins virtuelle) des Préalpes internes et externes par-dessous la nappe des Médianes, SCHARDT mettait en évidence l'un des traits les plus typiques de l'architecture des Préalpes[4]).

[4]) SCHARDT corrélait aussi les flysch du Niesen (Préalpes internes) et du Gurnigel (Externes), ce qui est incorrect. Rappelons que l'étude sérieuse des flysch était pratiquement impossible avant l'avènement de la micropaléontologie.

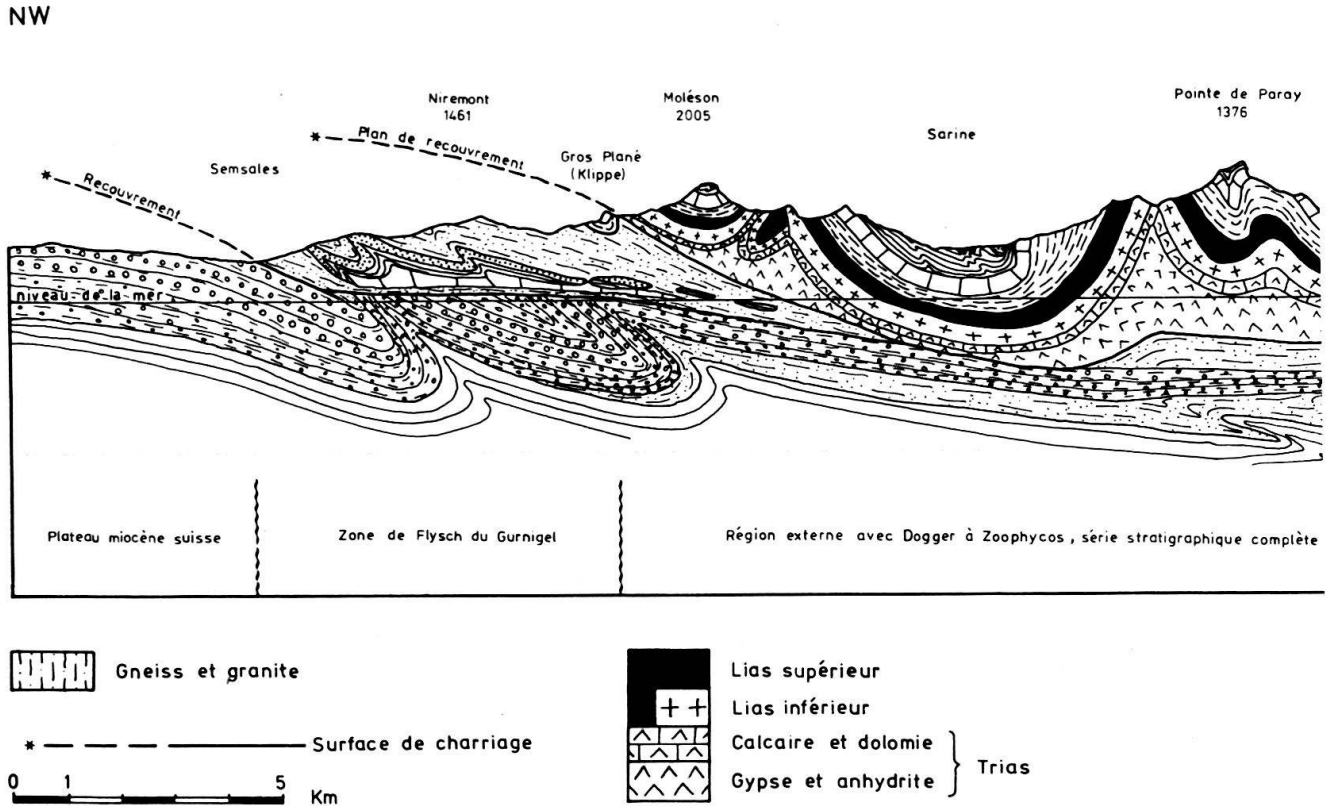


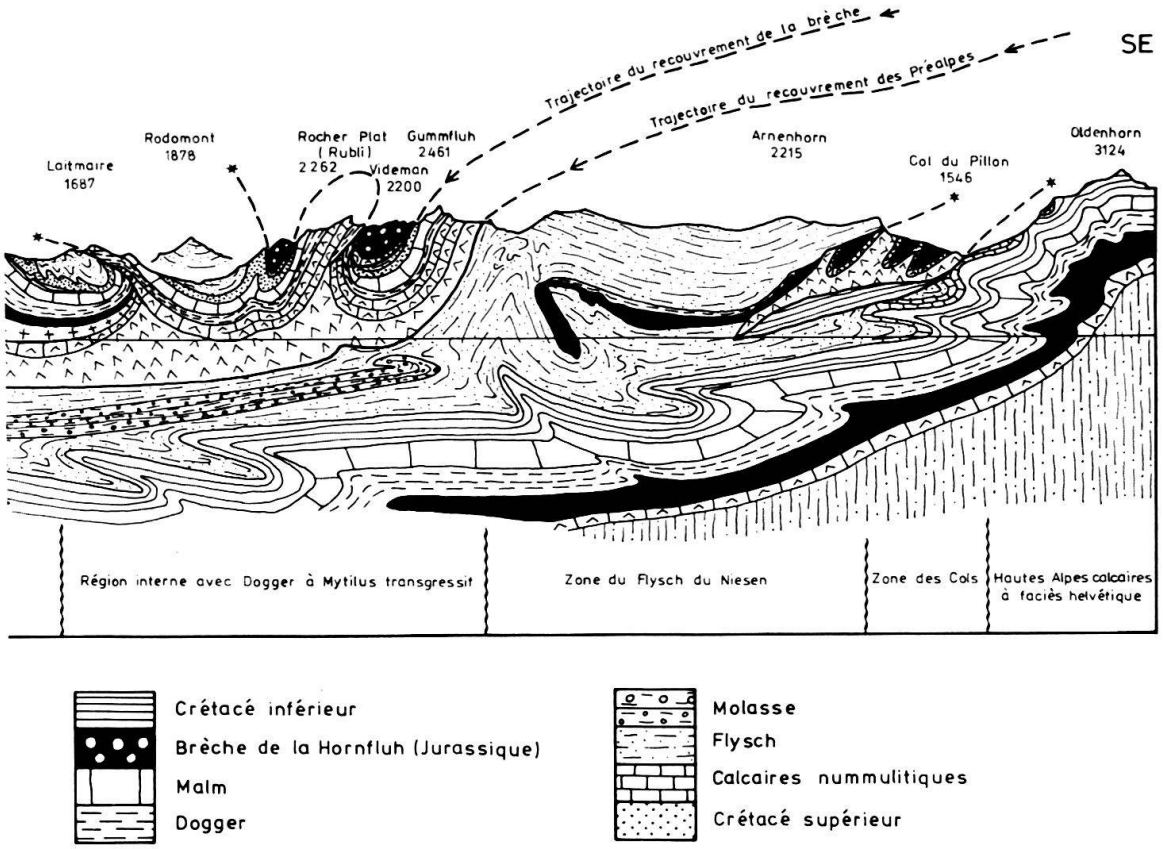
Fig. 2. Coupe tectonique des Préalpes romandes, redessinée d'après SCHARDT (1898, pl. I; dessin daté de 1897). Légende simplifiée.

3. *Evolution paléogéographique*

Sur la base de leurs faciès, SCHARDT replace les nappes dans leurs *positions originelles respectives.* Réciproquement, cette reconstitution palinspastique (la première du genre) explique les faciès particuliers de chaque nappe et leur évolution au cours du temps. *Au chaos paléogéographique,* SCHARDT *substitue un enchaînement cohérent de faciès dans l'espace et dans le temps.* Cette synthèse entre la tectonique et la stratigraphie d'une chaîne de montagnes représente l'un des plus brillants aspects de toute l'œuvre de SCHARDT (1898, p. 174 suiv.).

Il montre ainsi que les lambeaux mésozoïques de la bordure N des Préalpes et de la zone des cols trouvent leur place logique au S des Hautes Alpes de faciès helvétique (d'où le nom d'ultrahelvétique qui leur fut appliqué plus tard). Plus au S se trouvait le bassin des Préalpes médianes. Enfin, encore plus au S venait le bassin de la Brèche, séparé du précédent par un seuil partiellement émergé au Dogger, qui fut identifié plus tard (cf. IV.*D*) au géanticlinal *briançonnais* défini par HAUG (1894) dans les Alpes françaises. SCHARDT nous donne ainsi de ce domaine, l'un des plus typiques de la paléogéographie alpine, une reconstitution remarquable dont on appréciera le caractère moderne (fig. 3).

Mieux encore, grâce à ce schéma paléogéographique, SCHARDT explique l'origine de ces brèches sous-marines, sujet important et très à la mode de nos jours.



Elles proviennent de l'écroulement de falaises continuellement rafraîchies par l'activité tectonique de la marge S du seuil briançonnais:

«Le versant S était sans doute une falaise, se continuant par un abrupt sous-marin, siège de dislocations, provoquant des éboulements continuels et alimentant ainsi la formation de la brèche du Chablais et de la Hornfluh» (1898, p. 176).

En 1896, LUGEON était parvenu, au terme d'une étude minutieuse, à une conclusion analogue (alimentation de la brèche par les écroulements répétés d'une falaise mobile), qu'il n'avait toutefois pas insérée dans une reconstitution palinspastique aussi précise.

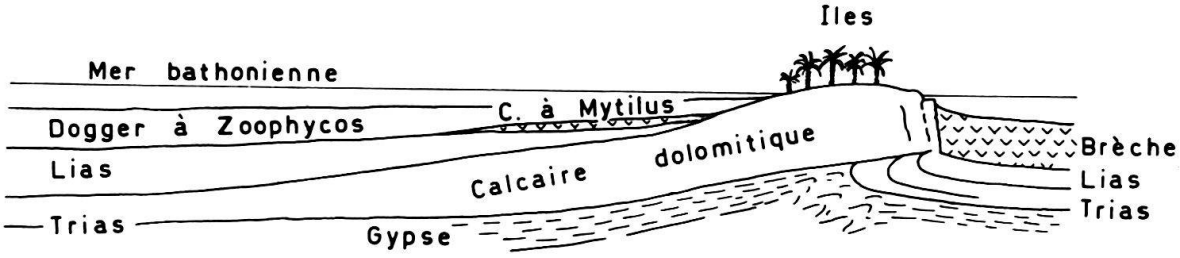


Fig. 3. Reconstitution palinspastique des positions originelles des nappes des Préalpes médianes (à gauche) et de la Brèche (à droite), séparées au Dogger par le seuil partiellement émergé des «îles bathoniennes» (assimilé aujourd'hui au domaine briançonnais). Redessiné d'après SCHARDT (1898, fig. 1).

4. Racines des nappes

SCHARDT suggère des *racines* (ou mieux, dans le langage actuel, des patries) à ses nappes. Si la provenance de l'Ultrahelvétique ne pose pas trop de difficultés, il n'en va pas de même des autres nappes. Il s'agit là de problèmes très difficiles, qui, aujourd'hui encore, sont loin d'être complètement résolus. SCHARDT reste d'ailleurs d'une grande prudence, qui lui fut reprochée par ses détracteurs, mais qui nous apparaît comme une preuve de sagesse.

C'est donc très précautionneusement que SCHARDT relève les affinités de plusieurs terrains des Préalpes avec ceux de «la zone sédimentaire intra-alpine du Briançonnais» ou des Alpes grisones et lombardes. Il est ainsi conduit à admettre pour le gros des Préalpes un charriage de 80 à 100 km, peut-être plus. Mais nous voulons surtout noter que SCHARDT était parfaitement conscient des difficultés inhérentes à de telles reconstitutions:

— Les terrains des Préalpes *ne peuvent plus se trouver dans leur région d'origine,* du fait même qu'ils sont maintenant au N des Alpes (1900, p. 150 et 164).
— Les reliques éventuelles ont été profondément modifiées par le métamorphisme, qui «a agi ... en sorte que les terrains restés en place en ont subi toute l'action, tandis que la nappe charriée vers le N est restée presque indemne» (1898, p. 177).
— Enfin, «ce qui en restait peut avoir été détruit par l'érosion».

On ajouterait seulement aujourd'hui que les reliques ont, de plus, pu être englouties par subduction.

Aussi SCHARDT réclame-t-il des recherches plus approfondies sur le terrain avant de désigner définitivement les racines des nappes. «La fixation exacte du gisement primitif de la nappe des klippes et des Préalpes ne saurait se résoudre à coups de plume! Il faudra des recherches longues et patientes», réplique-t-il en 1900 à l'un de ses plus éminents contradicteurs.

5. Dynamique des nappes

SCHARDT propose dès 1893 un *moteur* pour le transport des nappes dont il vient de révéler l'existence: le glissement par *gravité,* dont nous reparlerons plus loin. Il est conduit naturellement à cette idée par l'observation de toutes les transitions entre la dimension des blocs exotiques et celle des nappes, par l'intermédiaire des klippes (qui peuvent être soit des reliques d'érosion d'une nappe continue, soit d'énormes blocs emballés dans le flysch).

En 1898, il ajoute au moteur gravitatif la pression des plis et chevauchements profonds des Alpes penniques, dont l'entassement refoule les couvertures sédimentaires et crée le talus sur lequel elles glisseront lentement. «La superposition complète du gneiss d'Antigorio aux schistes lustrés mésozoïques, dans le massif du Simplon, montre l'énergie des dislocations des terrains profonds dans les parties centrale et méridionale des Alpes» (1899, p. 24). D'ailleurs, dès 1898, SCHARDT suggère que les dômes du Mont-Rose et de l'Adula ne sont, eux aussi, que les dos de plis couchés ou de chevauchements profonds.

6. Répercussions de la progression des nappes sur la sédimentation dans les bassins marins où elles glissent

SCHARDT explique par le *démantèlement du front des nappes en cours de progression* l'origine des *flysch à blocs exotiques*, ces complexes hétérogènes et souvent chaotiques qui firent couler tant d'encre. Ainsi peut-on concilier la provenance lointaine des éléments avec les indices d'un transport fluvial ou sous-marin beaucoup plus court.

«Où prendre les matériaux exotiques du flysch? La réponse se donne presque d'elle-même. Le mouvement de cette nappe doit avoir commencé pendant l'époque éocène, lorsque sur le bord N des Alpes se déposaient les calcaires nummulitiques. Il mit fin à cette sédimentation, pour inaugurer celle de la formation du flysch. Ce terrain a dû tirer la majorité de ses matériaux détritiques des débris détachés de cette muraille s'avançant lentement ... Il me semble en effet que *la formation du flysch doit être étroitement liée au développement de ces grandes nappes de recouvrement*» (1893, p. 580 et 582).

«Les blocs exotiques doivent être considérés d'ailleurs comme des débris de klippes, détachés de celles-ci pendant le démantèlement de la nappe ... Des masses importantes de terrain ont été détachées du bord de la nappe en mouvement et ont été empâtées dans le Flysch qui fut, de plus, refoulé; en sorte que nombre de ces lambeaux, même de très grands, furent littéralement enveloppés et roulés dans le Flysch, ainsi que je l'ai décrit à propos de la zone des cols et de la zone extérieure du Flysch des Préalpes» (1898, p. 209).

«Est-ce bien la vraie solution du problème que Studer avait posé il y a plus de 70 ans? Il me semble qu'il est difficile d'en douter, car toutes les complications sont explicables. Les blocs sont originaires d'un pays lointain; ils sont exotiques, mais leur transport s'est fait en masse, par charriage tectonique, sur 60 à 70 kilomètres de distance, sinon plus; aucune usure n'a été le résultat de ce long transport, et finalement les débris désagrégés et allant en s'éboulant, furent ensevelis sur place, après une courte chute dans la mer du Flysch et stratifiés alternativement avec les matériaux vaseux qui composent la majeure partie de cette sédimentation. Des masses plus grandes également, tombées au fond de la mer, formèrent les gros blocs exotiques et une partie des klippes.» (1898, p. 215).

Une fois emballés dans le flysch, les blocs seront ultérieurement chevauchés par la nappe qui leur a donné naissance, ce qui explique la complexité des relations actuelles. L'importance respective des facteurs tectoniques et sédimentaires dans la genèse et le transport des blocs et des lambeaux peut d'ailleurs varier. Si l'accent est généralement mis sur les écroulements et glissements synsédimentaires au front des nappes, ailleurs SCHARDT souligne le facteur tectonique dans l'origine des paquets de terrains «entraînés par la nappe de charriage et qui ont été pris dans le Flysch refoulé devant et au-dessous de celle-ci, puis enveloppés et enroulés littéralement dans ce terrain» (1898, p. 210).

Cette explication de l'origine des flysch à blocs et des klippes est une idée-force de SCHARDT, sur laquelle il revient souvent. C'est aussi, curieusement, un des aspects de son œuvre qui fut le plus négligé par la suite, avant que ces phénomènes soient redécouverts un demi-siècle plus tard. Les explications modernes, fondamentalement voisines, se distinguent surtout par l'usage d'un vocabulaire spécialisé (diverticules, olistostromes, etc.) mieux adapté à la discussion de ces problèmes. Mais SCHARDT montrait incontestablement une compréhension très avancée de ces concepts qui se situent au niveau de la synthèse entre la sédimentologie et la tectonique.

7. Bréchification à la base des nappes

La *cornieule*, brèche habituellement liée aux formations triasiques, est l'une des roches des chaînes alpines dont l'origine a suscité (et suscite encore) les plus vives

controverses. Les nombreuses théories proposées depuis un siècle peuvent se grouper en trois catégories: sédiment détritique, brèche tectonique, ou produit de métasomatoses plus ou moins mystérieuses. Dans les travaux les plus récents comme dans ceux du siècle dernier, on retrouve les mêmes conflits entre diverses variantes de ces trois groupes d'explications. Or SCHARDT avait déjà présenté en 1885 de bonnes raisons de croire à l'origine tectonique de cette roche (la seule explication valable à nos yeux, bien que tout le monde ne soit pas d'accord!); nous avons cité ailleurs un passage de cet article (MASSON 1972). Il convient toutefois de noter que SCHARDT en excluait certaines cornieules polymictes dont les propriétés paradoxales ne peuvent pas s'expliquer par un mécanisme tectonique simple et classique; mais on ne peut tout de même pas lui reprocher d'avoir ignoré certains concepts de la fracturation des roches qui n'ont été développés qu'après 1955.

En 1898, SCHARDT souligne que la cornieule forme une «zone de trituration» jalonnant la base de la nappe préalpine. Il intègre ainsi l'origine de cette roche à la tectonique des nappes, qui avançaient sur une semelle plastique (p.ex. gypse) ou «triturée» (cornieule).

8. Vaste étendue originelle des nappes préalpines

Pour SCHARDT, les nappes des Préalpes recouvraient à l'origine un territoire beaucoup plus vaste qu'aujourd'hui. Cela est prouvé par les *klippes* de Savoie et de Suisse centrale, reliques épargnées par l'érosion.

«Les lambeaux isolés des Gyswylerstöcke, du Stanzerhorn, du Buochserhorn, des Mythen, etc., sont des témoins plus qu'éloquents, qui attestent l'ancienne extension de la nappe chablaisienne vers le NE, par-dessus les Alpes d'Unterwald et de Schwytz» (1893, p. 578).

Vers l'E, les Préalpes vont probablement se rattacher à la «nappe du Rhaetikon» (1893) qui chevauche le flysch du Prättigau et du Vorarlberg. Les analogies de certains faciès sont frappantes, mais «des recherches détaillées seraient nécessaires» pour préciser les relations dans cette région où «la complication doit être extrême» (1898).

Enfin, l'érosion de ce vaste recouvrement a alimenté la *molasse* du Plateau suisse.

«L'érosion qui a caractérisé la période miocène eut pour effet de démanteler complètement cette nappe dans la partie comprise entre le lac de Thoune et le Rhin, en ne laissant subsister que des lambeaux, les grandes klippes. Dans la Suisse occidentale et le Chablais, où l'érosion fluviale a été bien moins intense, ainsi que l'atteste le faible développement des amas de poudingues miocènes, la nappe resta continue» ... «De cette manière s'explique ... le caractère austroalpin des matériaux des poudingues miocènes, en face des chaînes offrant aujourd'hui le faciès helvétique» (1898, p. 217).

B. 1893–1902: dix ans de lutte pour le triomphe d'une théorie

La théorie de SCHARDT fut accueillie avec autant de scepticisme que de stupeur. D'éminents géologues prirent la plume pour l'attaquer, en termes parfois violents. La lecture de ces âpres controverses montre que c'en était *trop*: SCHARDT introduisait trop d'idées trop hardies, et réclamait de ses lecteurs une maîtrise trop parfaite de la géologie des Alpes; tant il est vrai que, en ne regardant qu'un petit secteur de la chaîne, ou en ne considérant que certains types de phénomènes, d'autres théories

pouvaient paraître aussi satisfaisantes que celle des nappes; mais que celle-ci était la *seule* susceptible d'intégrer *tous* les faits observés dans une synthèse cohérente. Il fallut 10 ans au monde géologique pour digérer cette moisson de nouveautés. En attendant, SCHARDT, contrairement à BERTRAND, eut au moins la satisfaction d'être vivement critiqué, ce qui, à tout prendre, vaut mieux que l'indifférence.

D'abord complètement isolé, SCHARDT fut bientôt suivi par le jeune, brillant et ambitieux MAURICE LUGEON (1870–1953), dont l'œuvre puissante contribua grandement au succès de la nouvelle théorie. Né à Poissy, près de Paris, d'un père suisse qui revint quelques années plus tard au pays, LUGEON se passionna très jeune pour les sciences naturelles. Ayant commencé un apprentissage de banque à Lausanne, il passe ses loisirs à visiter la galerie du Musée de Géologie, où il attire l'attention de RENEVIER; en 1886, celui-ci lui offre une place de préparateur à 70 francs par mois. L'année suivante, LUGEON publie son premier travail sur des plantes fossiles de la molasse. Plein d'ardeur, il rattrape ses études pendant l'hiver, passant l'été sur le terrain. Il soutient sa thèse sur la brèche du Chablais en 1895, enseigne à l'Université dès 1896, est nommé professeur en 1898. Il y resta pratiquement jusqu'à sa mort.

Les premiers résultats de LUGEON sur la brèche du Chablais avaient joué un rôle important en convaincant SCHARDT de son âge jurassique (1893). Mais LUGEON lui-même expliquait la position de ces terrains par un pli en champignon selon la mode de l'époque. Pendant deux ans il s'opposa à SCHARDT, puis se convertit pendant qu'il rédigeait sa thèse. Dans la dernière partie de ce travail remarquable, LUGEON soumet toute la géologie des Préalpes chablaisiennes à une discussion serrée qui le mène à retrouver une partie des résultats de SCHARDT; il conclut que l'hypothèse d'un gigantesque chevauchement des Préalpes, venu du SE, est la plus vraisemblable. Dès lors LUGEON sera l'un des plus vigoureux partisans de la théorie des nappes, dont la percée au début du 20e siècle fut dans une très large mesure son œuvre.

Très diplomate quand il le voulait bien (mais féroce en d'autres occasions), LUGEON sut faire preuve d'une grande habileté pour un «révolutionnaire» (ainsi qu'on le qualifiait). Non seulement il appuyait ses conclusions sur des raisonnements très détaillés, mais il avait l'art de retourner les arguments de ses adversaires, les leur renvoyant intégrés à sa propre théorie, et ayant encore juste assez de mauvaise foi pour ajouter que son savant contradicteur «aura sa part légitime» dans la victoire des nappes ..., ce qui facilitait la reconversion des vieilles gloires aux nouvelles idées.

Le revirement critique se produisit en 1902. L'année précédente, la Société géologique de France avait demandé à LUGEON de conduire une excursion dans les Préalpes du Chablais; les discussions furent animées, et les résistances encore très vives. Le 17 février 1902, LUGEON présenta à Paris sa synthèse «Les grandes nappes de recouvrement» devant un auditoire au premier rang duquel figuraient bon nombre des plus éminents géologues de plusieurs pays. Dans cette vaste fresque qui couvrait les Alpes de l'Arve à Salzbourg, LUGEON dépeignit les enchaînements des structures et des faciès en des termes si convaincants qu'il enthousiasma ses auditeurs: ce fut le triomphe. «C'est tout le tableau de la structure harmonieuse des Alpes qui, féériquement, s'illumine, alors qu'avant ce prodigieux coup de projecteur, tous les éléments en paraissaient chaotiques» (FALLOT 1954). Mais la réaction la

plus touchante est certainement celle du vieux maître zürichois de la géologie alpine, ALBERT HEIM, qui prit trois mois de réflexion avant d'écrire à LUGEON:

«Votre théorie des plis de nos Alpes calcaires m'explique une quantité de faits qui, jusqu'ici, étaient restés pour moi énigmatiques ... Je suis très heureux de pouvoir vous dire que votre théorie m'apparaît comme une lumière nouvelle qui m'éclaire sur bien des points; c'est pour moi un grand plaisir de reprendre, sous ces points de vue rajeunis, l'étude de régions, à moi si connues et qui m'ont occupé si longtemps. En tout cas votre théorie, si étonnante, presqu'effrayante au premier abord, mérite l'examen objectif le plus attentif ... On peut dire aussi que dans ces études successives notre esprit s'est graduellement exercé à concevoir de mieux en mieux le mécanisme de la formation des Alpes. Les nouvelles théories se sont échafaudées en s'appuyant sur les anciennes. Mais cela m'est une vraie joie personnelle de reconnaître que mes élèves vont plus loin que moi et m'apprennent à accepter des idées devant lesquelles je m'étais jusqu'à présent arrêté.»

Une analyse moins lyrique et plus froidement objective nous poussera plutôt à comparer la synthèse de LUGEON (1902*a*) à celle de SCHARDT (1898). Force est de constater que, sur certains problèmes conceptuels, la synthèse de LUGEON nous apparaît aujourd'hui un peu en retrait de celle de SCHARDT, notamment sur ce qui touche à l'origine des blocs et des lambeaux exotiques, envisagée alors par LUGEON d'un point de vue trop exclusivement tectonique.

Plus généralement, la principale critique que nous croyons devoir adresser à l'œuvre de LUGEON du début de ce siècle, est qu'il considérait systématiquement les grands chevauchements comme dérivant de plis par l'intermédiaire de plis-failles couchés où l'élément faille l'emportait progressivement sur l'élément pli, à mesure que le front de la nappe s'éloignait de sa racine. Il s'agit là d'une hypothèse cinématique, dont la confirmation ou le démenti sont le plus souvent hors de notre portée, mais dont l'adoption généralisée eut des conséquences pratiques très importantes. Il semble que LUGEON doit cette «philosophie» tectonique autant à l'influence de BERTRAND, auprès de qui il étudia un hiver à Paris, qu'à son séjour zürichois auprès de HEIM en 1895–1896. Celui-ci, rappelons-le, avait brillamment révélé la plasticité des roches soumises à de fortes pressions, et la capacité des couches de s'étirer en s'amincissant. Il devenait dès lors très tentant d'interpréter tous les chevauchements comme des plis dont le flanc renversé, soumis à un étirement extrême, s'était réduit à une épaisseur nulle (ainsi HEIM interprétait le Lochseitenkalk comme le flanc renversé très étiré du «pli double» glaronnais).

Cette optique «ultra-ductile» pouvait présenter des avantages dans certaines parties de l'Helvétique, où LUGEON travaillait plus particulièrement à l'époque; mais sa généralisation à l'ensemble des nappes eut des conséquences négatives, et nos recherches historiques nous ont convaincu qu'elle fut même un sérieux frein à l'élucidation de plusieurs problèmes importants.

Les défauts du maître se trouvant traditionnellement grossis chez les disciples et les imitateurs, il en résulta chez beaucoup de géologues alpins une véritable obsession pour la recherche de charnières frontales ou radicales et de lambeaux de flancs renversés. Ainsi, l'un des points les plus criticables des brillantes reconstitutions d'ARGAND est qu'il dote systématiquement d'un flanc renversé des nappes qu'on sait aujourd'hui être dans bien des cas constituées d'un empilement d'écailles normales; erreur conceptuelle qui le conduisit, p.ex., à attribuer à l'«enveloppe» renversée de la nappe mésopennique du Grand St-Bernard la zone valaisanne de Sion, qu'on rattache aujourd'hui au Pennique inférieur. De même, lorsque LUGEON trouve des reliques d'Ultrahelvétique sur la nappe helvétique du Wildhorn, ce qui était une découverte importante (cf. IV. *C* et V. *C*), la superposition inverse des diverticules normaux lui fait croire qu'il est en présence du flanc renversé du «pli» ultrahelvétique, qu'il raccorde, également à tort, à l'Helvétique par une charnière synclinale. Les Préalpes montrent avec persistence des exemples des conséquences funestes de cette optique, à preuve certaines tentatives assez récentes de fabriquer un flanc renversé de la nappe de la Simme.

De là découle une déviation de la notion «schardtienne» de nappe dont les implications sur la nomenclature firent couler beaucoup d'encre. Alors que les exemples historiques des nappes (Glaris et Préalpes) sont de purs chevauchements[5]), comme d'ailleurs la majorité des nappes des Alpes et

[5]) Au moins dans leur état actuel. Pour la nappe helvétique de Glaris, plusieurs faits donnent consistance à l'hypothèse cinématique d'un premier stade sous forme d'un pli couché (TRÜMPY 1969).

probablement du monde, c'est le modèle fictif d'une nappe à flanc renversé (± réduit) qui s'imposa par les travaux de LUGEON et ses contemporains, en particulier TERMIER (1906); dans sa «Synthèse des Alpes», ce dernier consacra la primauté présumée des nappes-plis en les nommant *nappes du premier genre*, tandis qu'il mettait en doute l'existence même des vrais chevauchements: «Jusqu'à nouvelle découverte, toutes les nappes des Alpes sont, ou certainement, ou probablement, des plis couchés ayant atteint ou dépassé l'horizontale».

Pour expliquer cette grande plasticité des roches dans les nappes-plis, LUGEON était enclin à les faire mouvoir sous une forte pression, donc en profondeur (ou, dans le langage de TERMIER, sous un «traîneau écraseur»). Ce qui supprimait la possibilité des interférences tectonique-sédimentation que SCHARDT avait si bien mises en évidence dans les Préalpes, et menait en revanche à l'interprétation de mainte lame ou écaille (souvent un olistolite ou un diverticule dans le langage correspondant à nos interprétations actuelles) comme une tête de pli étranglée dans une ambiance d'extrême plasticité.

SCHARDT avait évité ce piège, comme nous l'avons montré, et considérait au contraire la mise-en-place des Préalpes comme l'effet d'une *tectonique superficielle en interaction constante avec la sédimentation.* En 1900 (p. 162), il ira jusqu'à répliquer à l'un de ses contradicteurs que si les Préalpes montraient un flanc renversé, il n'aurait jamais conçu l'hypothèse du charriage lointain!

Nous verrons que, plus tard, LUGEON se corrigea lui-même. Il développa alors, sous une forme adaptée au contexte d'une géologie préalpine qui avait fait entre temps de grands progrès, des vues qui marquent à cet égard un retour aux conceptions originelles de SCHARDT (glissement gravitatif, diverticulation, etc.).

Nous croyons qu'il était utile d'insister sur ce problème conceptuel et méthodologique; car nos recherches nous ont convaincu que la notion de chevauchement dérivant d'un pli couché a été pendant 40 ans un «archétype» de la géologie alpine, un modèle inconsciemment sous-jacent et dont les implications, immédiates ou lointaines, conditionnèrent de très nombreux travaux.

Sur d'autres points, en revanche, LUGEON ouvrait de brillantes perspectives. Ainsi, sur le plan régional, LUGEON étendait le domaine d'application de la théorie des nappes à tout l'Helvétique, que SCHARDT n'avait guère touché; et, plus sommairement, aux zones profondes des Simplo-tessinoises (où il découvre en passant la nappe du Monte-Leone, confirmée en 1903 par le percement du tunnel du Simplon), et même à une partie des Alpes orientales. En fait, dans une vision synthétique des Alpes, l'existence de nappes dans certaines parties de la chaîne impliquait logiquement leur existence dans d'autres (c'est ce qu'avaient aussi bien compris certains adversaires des nappes, tel HAUG en 1899, dans un commentaire qui se voulait ironique mais fut involontairement prophétique: si on suivait la théorie de SCHARDT, disait-il, «il ne resterait plus, dans la chaîne des Alpes, que bien peu de parties qui ne seraient pas en recouvrement» ...). L'ampleur de ce champ d'application, qui témoignait d'une érudition pour le moins remarquable chez un jeune homme de 32 ans, compta certainement pour beaucoup dans l'impact du discours de LUGEON.

Or l'extension du système des nappes à tous les secteurs de l'édifice alpin, et surtout au socle gneissique des Alpes penniques, conduisait LUGEON (1902*b*) à une estimation de la *contraction de la croûte terrestre* bien supérieure à ce qu'on avait jusqu'alors cru possible: *«Mesuré sur les Alpes actuelles»* (c'est-à-dire, selon l'habitude, dans le référentiel lié au substratum originel des nappes, cf. fig. 1), le chemin parcouru par les nappes préalpines *«atteint environ 80 kilomètres, mais si l'on essaye ... de placer côte à côte dans leur position primitive ces masses qui sont actuellement superposées»* (c'est-à-dire de mesurer la translation dans le référentiel de l'avant-pays stable), *«on arrive à des valeurs dépassant plusieurs centaines de kilomètres»*. Et pour donner une comparaison, LUGEON affirme qu'on pourrait obtenir une chaîne de la largeur des Alpes «si l'on contractait sur eux-mêmes les territoires

méditerranéens entre Alger et les côtes de France, avec la même intensité que celle qui a présidé à la formation des Alpes». Inutile de souligner la hardiesse de ces vues, qui préfigurent les théories d'ARGAND et WEGENER (IV. *E*).

Un autre point très important, sur le plan conceptuel, est que LUGEON (1902*a*) introduisait pour la première fois une *chronologie de la mise-en-place des nappes,* en montrant que le mouvement de l'Ultrahelvétique avait précédé celui de l'Helvétique, dont les plis frontaux pénètrent «comme un coin dans la partie interne des Préalpes» (fig. 4)[6]). En termes modernes, LUGEON montra que les surfaces axiales et de chevauchement d'un groupe de nappes sont déformées par la mise-en-place d'un autre groupe de nappes. La notion de pli complexe résultant de la surimposition de deux phases de déformation était déjà connue (bien qu'encore peu utilisée), du moins dans le cas simple de deux plissements d'axes parallèles (DE MARGERIE & HEIM 1888, p. 61–63). Mais à l'échelle de la tectonique des nappes, ce *passage de la géométrie à la cinématique* était une nouveauté d'une grande importance, dont le principe ne tarda pas à être appliqué avec succès dans d'autres régions.

La date de 1902, qui marque le ralliement massif des géologues alpins à la théorie des nappes, clot la «période héroïque», celle des combattants solitaires de la première heure – BERTRAND, SCHARDT, LUGEON. Désormais, dans les Alpes, on ne discute plus le principe des nappes, on les compte et on cherche leurs racines. La voie était ouverte, une multitude s'y rua. Le modèle entrevu par BERTRAND à Glaris, élaboré par SCHARDT dans les Préalpes, et déjà extrapolé par LUGEON à une grande partie des Alpes, fut aussitôt exporté dans des chaînes de tous les pays et tous les âges.

LUGEON, le premier, donna l'exemple. En 1903, il montra l'existence de nappes charriées du S vers le N dans les Carpathes, qu'il n'avait jamais visitées et ne connaissait que par la littérature. La même année, après une brève excursion, il présenta cette hypothèse au Congrès géologique international de Vienne:

«Lorsque le Congrès géologique se réunit à Vienne, il n'était question, en effet, que du jeune géologue vaudois qui voulait non seulement bouleverser la tectonique de toutes les Alpes et les conformer au modèle effarant qu'il avait proposé pour le Chablais, mais qui prétendait, en outre, étendre ses vues révolutionnaires aux Carpathes qu'il ne connaissait que par la récente description d'UHLIG et la rapide excursion qu'il venait de faire sous la direction du grand professeur viennois. UHLIG, qui plus tard se ralliera aux vues de LUGEON, en était très affecté et il comptait, avec tous ses amis, sur HEIM pour réduire à sa juste proportion l'outrecuidance de son jeune adversaire. Aussi la stupéfaction fut-elle à son comble lorsque – après la conférence de LUGEON – HEIM vint confirmer les exemples les plus frappants de cette théorie. Malgré les quelques faits que HEIM réservait encore pour une vérification, son intervention fut pour LUGEON un véritable triomphe» (DE BETHUNE 1955).

Il va de soi que, dans cette course aux nappes, à côté de belles découvertes, des excès furent aussi commis. Trop de gens voulurent en toute hâte prendre le train en marche, et, pour être sûrs d'être dans le vent, publièrent des applications bâclées de la nouvelle théorie (situation qui rappelle la course aux plaques de ces dernières années). On vit des ultra-nappistes décrire des nappes qui n'existaient que dans leur

---

[6]) Malheureusement, LUGEON généralisa ce résultat à l'ensemble des Préalpes, alors qu'en toute rigueur ses arguments ne concernaient que l'Ultrahelvétique des Préalpes internes. Depuis 1902, tous les auteurs répètent après lui que l'arrivée des Préalpes (sauf le Niesen, démontré plus tardif par BADOUX en 1945) est antérieure à celle des nappes helvétiques. Cette généralisation, acceptée comme un dogme, nous paraît beaucoup plus douteuse.

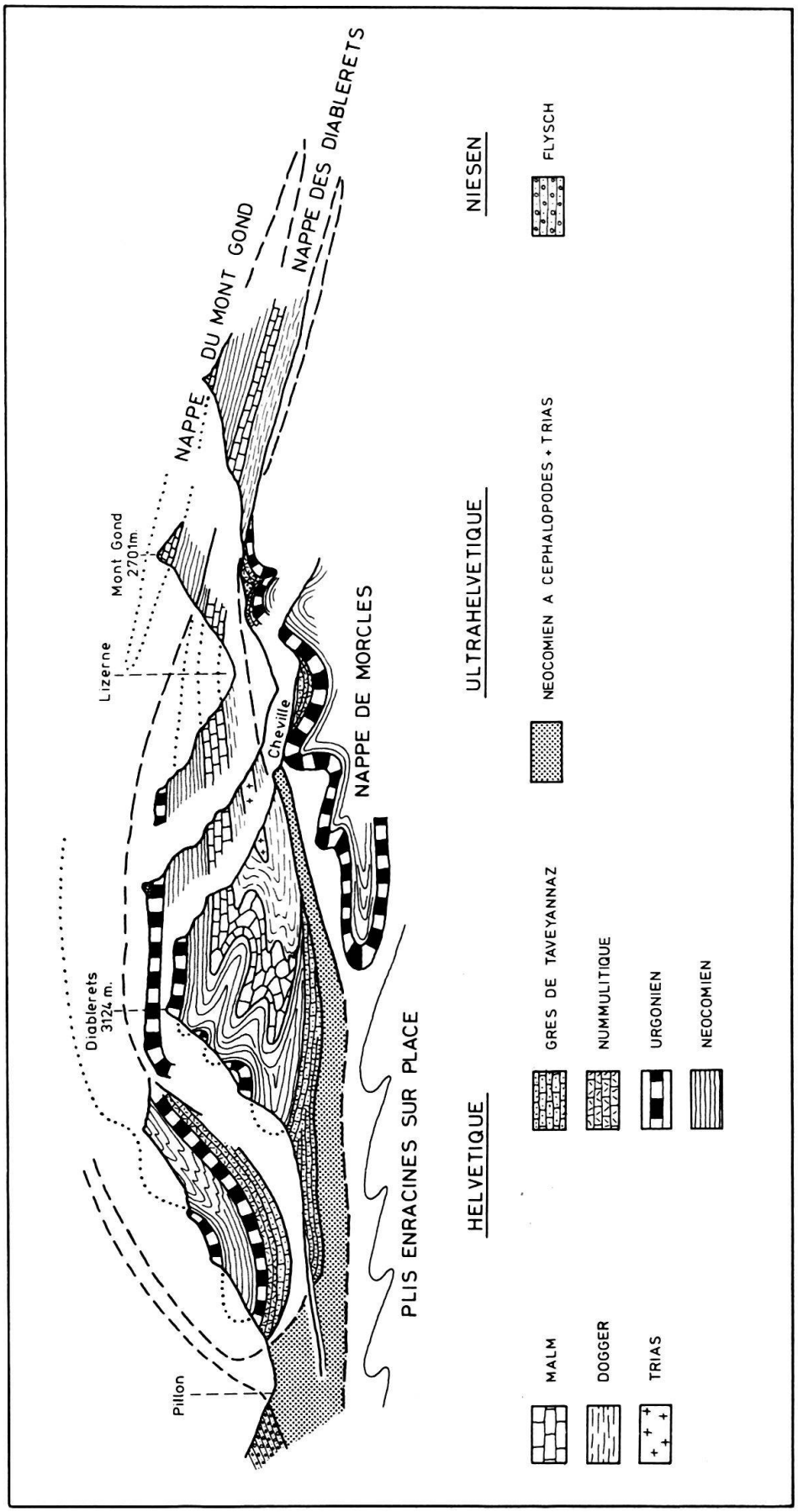


Fig. 4. Coupe tectonique du massif des Diablerets, redessinée d'après LUGEON (1902, fig. 3).

Cette coupe montre la superposition des trois nappes helvétiques de Morcles, des Diablerets, et du Wildhorn (= «du Mont Gond»), le tout recouvrant l'autochtone nordhelvétique (= «plis enracinés sur place»). Le but principal de LUGEON était d'établir que le massif des Diablerets forme une nappe superposée à celle de Morcles (comparer avec la fig. 2 où l'Oldenhorn, sommet voisin des Diablerets, est encore dessiné en place). Mais le point le plus intéressant est que LUGEON montre comment l'Ultrahelvétique, nappe complexe supérieure aux trois nappes helvétiques et d'origine plus méridionale, s'insinue par la gauche entre les nappes de Morcles et des Diablerets. LUGEON en déduisit que la mise-en-place des nappes jumelées Diablerets + Wildhorn est postérieure au recouvrement de l'Helvétique par l'Ultrahelvétique. LUGEON expliquait ainsi, par la tectonique, l'énigme paléogéographique de l'existence d'une bande de Crétacé à faciès profond («Néocomien à Céphalopodes») comprise entre deux zones de Crétacé néritique (avec Urgonien récifal).

Parmi les retouches qu'il convient d'apporter aujourd'hui à cette coupe, la plus importante est le rattachement à l'Ultrahelvétique du Trias que LUGEON attribuait à la nappe des Diablerets.

imagination; erreurs qui alimentèrent l'inévitable réaction des anti-nappistes, dont quelques chapelles subsistèrent çà et là jusqu'à nos jours. Mais ces aléas sont presque du ressort de l'anecdote. Grâce aux efforts des pionniers dont nous avons résumé l'œuvre, une manière totalement nouvelle de concevoir la structure et l'histoire des chaînes de montagnes s'était imposée dans les Sciences de la Terre.

IV. 1902–1940: l'application de la théorie des nappes et le problème des racines

A. Introduction

Pendant que le concept de nappe triomphait dans la plupart des chaînes de montagnes du globe, la géologie des Préalpes entra dans une phase relativement plus calme d'application de la nouvelle théorie. Il s'agissait désormais d'exploiter et de perfectionner un modèle dont le principe n'était plus contesté. Et c'est sans grand bouleversement théorique que s'accumula, pendant 40 ans, une nouvelle masse de données dont nous ne pouvons citer ici que les plus marquantes. Nous insisterons sur la tectonique, mais il ne faut pas oublier que les Préalpes furent aussi le lieu de belles recherches stratigraphiques, parmi lesquelles les plus remarquables sont certainement celles de JEANNET (1912–18) et de PETERHANS (1926).

La première tâche était de compter les nappes, reconnaître leurs limites, et s'assurer de leur ordre de superposition. Mais le problème crucial, pierre de touche de la nouvelle théorie, consistait à découvrir les *racines ou patries* de ces nappes. Il est évident que ce problème ne pouvait pas être résolu à l'intérieur des seules Préalpes, et il mobilisa bien des énergies des Alpes françaises aux Grisons. Inutile d'en souligner les grandes difficultés, déjà relevées par SCHARDT (cf. III. *A.4*). Nous ne serons donc pas surpris d'apprendre qu'il ne fut, dans la plupart des cas, pas résolu à la satisfaction générale pendant la période considérée; et pour ne pas en laisser la discussion inachevée, nous anticiperons dans ce chapitre sur la période contemporaine et nous exposerons brièvement les solutions préconisées par les travaux récents.

On peut comparer la recherche des racines d'un ensemble de nappes à la résolution d'un vaste système d'équations. Ce système comporte de très nombreuses inconnues, mais heureusement aussi de très nombreuses relations, les unes de nature géométrique, les autres stratigraphiques, pétrographiques, etc. Or on ne connaît pas de méthode toute faite pour extraire la solution du système extrêmement complexe des équations alpines, et c'est d'ailleurs bien là que réside l'intérêt de cette affaire. Le géologue doit donc procéder par un «tâtonnement synthétique» qui consiste à la fois à éliminer les solutions menant à des contradictions et à rechercher des combinaisons inédites, sans jamais perdre de vue l'ensemble du problème. Cette démarche, typique pour la recherche en rétrodiction dans les très grands systèmes, confère à l'histoire de la géologie alpine un intérêt méthodologique dont la portée scientifique dépasse largement les problèmes de nos montagnes. *«Là où font défaut le souvenir, ou l'intuition qui livre la clé des traces (ces ‹fossiles›) d'un état passé du monde, la rétrodiction devient un art de haute conjecture, impliquant toute la difficulté des ‹problèmes de probabilité des causes›, et requérant toute l'imagination créatrice des constructeurs de théories»* (COSTA DE BEAUREGARD 1963).

B. Les nouvelles nappes

Aux trois nappes de SCHARDT ne tardèrent pas à s'ajouter plusieurs autres, à commencer par celle du *Niesen*, qui comprend la plus grande partie du flysch des Préalpes internes. L'individualité de ce flysch très conglomératique avait été reconnue depuis longtemps (STUDER 1834); mais SCHARDT, bien qu'il ait dessiné dans ses coupes de 1898 un plan de chevauchement à sa base (fig. 2), ne l'avait pas distingué au niveau d'une nappe indépendante. Cela fut proposé par LUGEON en 1902 (*a*), et confirmé par les travaux ultérieurs.

Quoique des fossiles crétacés y aient été trouvés dès le 19e siècle, ce flysch fut longtemps attribué au Tertiaire par suite de confusions avec d'autres flysch préalpins. Finalement, l'âge crétacé supérieur de la plus grande partie du flysch du Niesen fut définitivement admis lorque LUGEON (1938) mit un peu d'ordre dans ces problèmes en montrant qu'il fallait en séparer tectoniquement le flysch du *Meilleret*, de lithologie voisine mais d'âge éocène.[7]) Ce dernier constitue une petite nappe indépendante située sous celle du Niesen, et rangée habituellement par commodité dans l'Ultrahelvétique. MCCONNEL & DE RAAF (1929) montrèrent que le flysch du Niesen transgresse sur une série triaso-jurassique (-crétacée inf.?) réduite, qu'ANDRAU (1929) avait appelée zone de Murgaz.

En 1914, LUGEON découvrit à la base de cette nappe un petit lambeau de socle gneissique d'affinité pennique. Cette trouvaille joua un rôle important dans les discussions sur la provenance des nappes préalpines, car elle établissait l'origine pennique d'au moins l'une d'elles, à une époque où beaucoup de géologues étaient tentés d'enraciner presque toutes les Préalpes dans l'Austroalpin. LUGEON crut même pouvoir préciser que le Niesen provenait d'une digitation élevée de la nappe du Grand St-Bernard, ce qui témoigne d'une confiance vraiment excessive dans la valeur de corrélations lointaines fondées sur des lambeaux de socle. En fait, sur la base de ses analogies stratigraphiques et du contenu de ses conglomérats, on enracine aujourd'hui la nappe du Niesen dans la zone frontale du Pennique inférieur (HAUG 1925, TRÜMPY 1955, HOMEWOOD 1974).

Toujours dans les Préalpes internes, la *zone submédiane* fut définie par MCCONNEL & DE RAAF (1929) entre les nappes du Niesen et des Préalpes médianes. A l'époque elle eut peu de succès. Pourtant la conception de ces auteurs semble essentiellement correcte, et les travaux récents (WEIDMANN et al. 1976) confirment l'indépendance de cette zone de structure compliquée, dont les faciès variés représentent de précieux jalons entre les bassins sédimentaires des deux nappes qui l'encadrent.

Mais la découverte la plus importante de cette période fut celle d'une nappe jusqu'alors totalement insoupçonnée[8]) au sommet de l'édifice préalpin. C'est en

---

[7]) La possibilité que le flysch du Niesen monte jusque dans le Tertiaire reste encore discutée à l'heure actuelle.

[8]) Si l'on excepte une suggestion de KILIAN (1894), qui, acceptant partiellement la théorie de SCHARDT (pour la nappe de la Brèche seulement), émit l'idée que les roches vertes des Gets pourraient être des «lambeaux noyés dans le flysch» d'un «deuxième plan anticlinal couché» sur celui de la Brèche, et qui proviendrait de «la zone du Mont-Blanc». Bien qu'on soit encore fort loin de la remarquable conception de STEINMANN, on peut voir dans cette idée de KILIAN le premier germe de la notion d'une nappe supérieure.

1905 que STEINMANN, qui venait de se convertir aux théories de SCHARDT et LUGEON, proposa de corréler les blocs de radiolarites, calcaires clairs à Aptychus, et ophiolites emballés dans le flysch environnant la Brèche, avec la «nappe rhétique» des Grisons, qu'il plaçait au-dessus des autres nappes préalpines. L'existence de cette nappe supérieure fut confirmée par deux élèves de LUGEON - JEANNET (1909 et 1912) et RABOWSKI (1909 et 1920) - qui en découvrirent des lambeaux importants protégés de l'érosion dans des synclinaux des Médianes et au front de la Brèche. Ces lambeaux comprenaient notamment un flysch marno-gréso-conglomératique (déjà distingué par STUDER 1834 sous le nom de groupe de la Mocausa), qui livra à JEANNET une riche faune datée du Cénomanien. L'existence de ce flysch crétacé superposé à celui, éocène, des Médianes, prouvait la réalité de la nappe entrevue par STEINMANN; RABOWSKI (1920) la baptisa *nappe de la Simme.*

Si sa superposition aux Préalpes médianes ne faisait aucun doute, en revanche ses relations structurales avec la nappe de la Brèche paraissaient moins évidentes, car elle enveloppe le front de cette dernière; aussi leurs positions respectives et même le principe de l'appartenance des ophiolites à une nappe distincte de la Brèche furent-ils vivement controversés jusqu'au début des années 60. Ce n'est que depuis les travaux de BADOUX (1963*a*), CARON (1965), et CARON & WEIDMANN (1967), qu'on peut considérer ces problèmes comme définitivement tranchés dans un sens conforme à l'opinion originelle de STEINMANN, et que la supériorité de la nappe de la Simme ne paraît plus soulever d'opposition. Les travaux récents montrèrent aussi que les importantes découvertes de STEINMANN, JEANNET et RABOWSKI n'étaient qu'un début, car les recherches micropaléontologiques obligèrent, jusqu'à ces dernières années, à séparer des nappes des Médianes et de la Brèche des portions toujours plus considérables des flysch qu'on leur attribuait autrefois; si bien qu'on reconnaît aujourd'hui, coiffant les Médianes et la Brèche, tout un complexe de *nappes supérieures* (*Sarine, Dranses, Simme* s.str. et *Gets,* cette dernière avec les ophiolites) dont CARON (1972) a présenté une synthèse récente.

Dans son travail de 1905, STEINMANN préconisait aussi d'interpréter les radiolarites et les calcaires à Aptychus de la «nappe rhétique» comme des sédiments de grande profondeur, et insistait sur leur relation étroite avec les ophiolites qui leur sont «symbiotiquement» associées. Par ailleurs, ARGAND (1909) et JEANNET (1912) soulignèrent la similitude frappante de ces roches des Préalpes avec des terrains du Canavese et de la région insubrienne (Alpes lombardes). D'une étude attentive des éléments du conglomérat de la Mocausa, JEANNET (1912) conclut qu'il est très semblable à un conglomérat d'âge aussi crétacé supérieur des Alpes lombardes:

> «Il y a donc un matériel clastique commun à ces deux sédiments et ... les régions d'alimentation de ces poudingues n'étaient pas très éloignées ou se trouvaient dans des territoires recouverts de terrains en partie identiques.»

Ainsi prenaient corps tout à la fois l'idée d'une origine très méridionale de la nappe de la Simme (dans la cicatrice du Canavese selon ARGAND), donc d'une translation de grande amplitude (100 à 130 km depuis la position actuelle du Canavese), et celle d'une connexion de la patrie de cette nappe avec un important bassin océanique. Une fois encore, ces idées furent vivement combattues, avant d'être réhabilitées par des travaux récents qui en montrent les conséquences très importantes pour les relations des Alpes avec les autres chaînes de la Méditerranée

(ELTER et al. 1966, BADOUX 1969, TRÜMPY 1976). On peut gager que le dernier mot n'est pas encore dit sur cette grande affaire.

C. Origine de l'Ultrahelvétique

Quant aux trois nappes qui étaient déjà connues avant 1902, la discussion de leur origine alla bon train, avec des fortunes diverses.

La provenance de l'*Ultrahelvétique* fit facilement l'unanimité. LUGEON (1901, 1902*a*) en trouva plusieurs reliques (Laufbodenhorn, Plaine Morte, etc.) égrenées sur le dos de l'Helvétique, jalonnant le raccord des Préalpes internes à leur patrie au bord S des racines helvétiques. Il montra aussi que les faciès du Crétacé helvétique évoluent latéralement en s'approfondissant du N, où ils contiennent des calcaires récifaux, vers le S, où ils deviennent identiques aux marnes bathyales du «Néocomien à céphalopodes» des Préalpes internes; ce qui entraînait la conviction que leurs bassins de sédimentation étaient originellement juxtaposés. Tous ces faits, que LUGEON développa en détail dans un mémoire classique (1914–18), confirmaient pleinement l'hypothèse de SCHARDT sur l'origine sudhelvétique de cette nappe inférieure des Préalpes; à l'heure des grandes controverses, ils furent un appui puissant à la théorie du charriage.

Si l'accord se fit promptement sur les grandes lignes, d'épineuses difficultés surgirent au niveau des détails. Il apparut rapidement que la structure de l'Ultrahelvétique est d'une extrême complexité; en fait, comme le notèrent plusieurs auteurs (et non des moindres) qui y mirent leur talent à l'épreuve, l'Ultrahelvétique est l'une des zones des Alpes où les complications tectoniques atteignent leur comble; et l'on ne peut qu'admirer les premiers chercheurs qui tentèrent d'y voir clair. LUGEON et ses élèves, notamment, consacrèrent une grande partie de leurs efforts à en débrouiller les structures, à y établir des subdivisions significatives (on distingue aujourd'hui dans l'Ultrahelvétique une demi-douzaine de nappes différentes), et à comprendre les mécanismes de leur mise-en-place. On trouvera un historique de ces recherches dans la note synthétique de BADOUX (1963*b*). L'accumulation patiente de descriptions locales détaillées aboutit enfin à un résultat fructueux lorsque BADOUX et LUGEON, dans les années 40, forgèrent le concept de *diverticulation* qui se révéla un outil efficace pour comprendre la structure infiniment complexe de cette zone; nous y reviendrons (V. *C*).

D. Origine des Médianes et de la Brèche

1. Le problème

C'est autour de l'origine de la nappe des *Préalpes médianes* que s'engagèrent les plus vives controverses (cf. STAUB 1958). Cette ardeur s'explique non seulement par l'importance propre des Médianes, mais surtout parce que le choix d'une solution entraînait des conséquences capitales pour toute la géologie des Alpes. En quelque sorte, c'est sur ce problème que se cristallisa la discussion des implications à grande échelle de la théorie des nappes pour la synthèse des Alpes. Cette controverse comporte d'intéressants aspects méthodologiques que nous résumerons brièvement.

Le métamorphisme et la déformation qui affectent les Alpes pennines y rendirent longtemps incertaine l'identification d'une «racine» des Médianes sur la transversale des Préalpes. Aussi les géologues alpins cherchèrent-ils des corrélations de faciès avec des couvertures internes sur d'autres transversales mieux préservées; de là, on espérait revenir à la transversale Préalpes-Valais-Ivrée en suivant «cylindriquement» les reliques de couvertures mésozoïques pincées entre les épaisses nappes du socle pennique. Or, dans leurs recherches de corrélations, les géologues avaient le choix entre deux directions: vers le SW (Alpes françaises), ou vers l'E (Grisons); et, selon qu'ils choisissaient l'une ou l'autre, ils n'arrivaient pas au même résultat ...

Du côté du SW, la plupart des géologues français et quelques suisses insistaient sur les analogies de faciès des Préalpes médianes avec les zones du Briançonnais et de «l'Embrunais» (= Subbriançonnais s.str. + Brèches de Tarentaise + Aiguilles d'Arve + nappes de l'Ubaye-Embrunais de la nomenclature actuelle). KILIAN (1912) et surtout RENZ (1935) révélèrent l'affinité briançonnaise du Jurassique littoral et continental de la partie interne des Préalpes médianes (couches à Mytilus, cf. fig. 3) avec tant de détails qu'il semble que cette démonstration aurait dû exercer une influence décisive. Tel ne fut pourtant pas le cas, car à l'époque on croyait généralement suivre vers le NE l'ensemble de ces zones, définies de façon trop peu précise et au contenu trop hétérogène, dans le Val Ferret puis dans la vallée du Rhône sous le front du Grand St-Bernard (zone de Sion). Si bien que cette conception, qui partait d'une corrélation de faciès correcte entre le Briançonnais et une partie des Préalpes médianes[9]), aboutissait au résultat de faire sortir celles-ci de la zone nordpennique de Sion-Ferret (p. ex. SCHMIDT 1907, GIGNOUX 1936, TERCIER 1945, qui voulaient y enraciner non seulement les Médianes mais toutes les Préalpes). C'est la solution «courte» de l'origine des Préalpes, que beaucoup de géologues suisses jugeaient difficile à accepter, vu l'absence de faciès comparables à ceux des Médianes dans cette zone de Sion.

Une solution moins courte et plus équilibrée fut préconisée par HAUG. Ce grand stratigraphe avait d'abord été, pendant une dizaine d'années, l'un des plus farouches adversaires de la théorie des nappes, et ses controverses avec SCHARDT sont célèbres. Converti en 1902 par LUGEON, il mit dès lors ses connaissances encyclopédiques au service de la nouvelle théorie, et publia en 1925 une brillante synthèse des Alpes W qui offrait au dilemme de l'origine des Préalpes une réponse basée sur des arguments stratigraphiques détaillés et qui se rapproche beaucoup des idées actuelles: enracinant le Niesen seul dans la zone pennique frontale de Sion, suite de sa «nappe de l'Embrunais», il situait les équivalents suisses du Trias briançonnais (donc la racine des Médianes) dans les calcaires des Pontis, au S de la zone précédente.

---

[9]) Souvent mêlée d'autres corrélations incorrectes. Nous ne pouvons détailler ici les solutions présentées par chaque auteur, ce qui prendrait d'autant plus de place que les plus prolixes (HAUG, STAUB) modifièrent plusieurs fois leurs thèses. Ajoutons que le contenu des différents noms de zones géologiques (p. ex. nappe de l'Embrunais, zone de Ferret, des Aiguilles d'Arve, Subbriançonnais, etc.) a lui aussi varié avec le temps, généralement dans le sens d'un rétrécissement; ce qui complique beaucoup l'abord de cette littérature. Nous nous bornons ici à schématiser les principaux traits des thèses en présence, en insistant plus sur les problèmes de fond que sur la nomenclature ou les détails historiques.

Or cette solution avait déjà été proposée par SCHARDT en 1907:

«La masse de calcaire triasique, dit des Pontis sur le versant S de la vallée du Rhône est, à part un degré de métamorphisme plus avancé, tout à fait identique au Trias des Préalpes du groupe du Rubli-Gummfluh-Spielgerten. Ce terrain accompagne ici la quatrième nappe de gneiss [= Grand St-Bernard], au-dessous de laquelle trois autres [= Antigorio, Lebendun et Monte Leone] ont formé un ‹pont› tandis que leurs enveloppes sédimentaires se sont fondues dans la masse des ‹schistes lustrés› [= zone de Sion].»

On ne saurait mieux résumer en deux phrases les vues actuelles ... Mais une fois de plus SCHARDT ne fut pas écouté, et cet article n'est cité par aucun des auteurs qui s'occupèrent de cette question.

Les principaux ténors suisses des corrélations alpines - LUGEON, ARGAND, et surtout STAUB - préféraient regarder vers l'E: ils corrélaient les faciès des Préalpes médianes avec ceux des nappes du Falknis et de la Sulzfluh, ce qui est correct. Mais de là, trompés par les rétrocharriages de grande amplitude qui affectent les arrières de ces nappes et les flysch sous-jacents du Prättigau, ils commettaient l'erreur de les enraciner au S du Pennique, donc dans l'Austroalpin. Cette attribution menait à la solution «longue», soit à faire venir toutes les nappes préalpines (sauf l'Ultrahelvétique et le Niesen) du Canavese et de la zone d'Ivrée.

2. *Vues actuelles*

On sait qu'aujourd'hui l'accord semble se faire en faveur d'une solution plus différenciée (TRÜMPY 1955 et 1960). Le Niesen sortirait bien du Pennique frontal, conformément à la solution courte; à l'opposé, la Simme pourrait bien provenir du Canavese, comme le voulait ARGAND; et, entre deux, les Médianes s'origineraient quelque part «dans» la nappe mésopennique du Grand St-Bernard (mais en tout cas en arrière de la zone de Sion).

On doit à ELLENBERGER (1950, 1952 et 1958*a*) d'avoir apporté des arguments décisifs sur ce dernier point; après avoir mis en relief les ressemblances des Trias du Briançonnais et de la partie interne des Préalpes médianes, ce qui confirmait la conclusion de KILIAN et RENZ sur les faciès jurassiques, il démontra d'une manière convaincante l'affinité briançonnaise des lambeaux de couverture pincés entre et sur les écailles de socle du Grand St-Bernard (Pontis, Barrhorn, etc.). Récemment, la parenté des Trias des Médianes et du Briançonnais à été précisée d'une façon encore plus détaillée par BAUD & MEGARD-GALLI (1975).

Or à peu près à la même époque, les géologues travaillant dans les Grisons étaient amenés à descendre les nappes Falknis-Sulzfluh de l'Austroalpin dans le Pennique moyen (TRÜMPY 1960, STREIFF 1962, réhabilitant une idée de HAUG sur l'ampleur des rétrocharriages dans les Grisons). Tandis que BARBIER (1952) et TRÜMPY (1955) procédaient à un important travail de clarification de la tectonique et des corrélations jusqu'alors très confuses dans la zone nordpennique entre les Alpes françaises et le Valais. Cet effort se poursuit (ANTOINE 1972) et fournira certainement de nouveaux points d'accrochage aux géologues préalpins. Pour ce qui nous concerne ici, le résultat crucial des récents travaux sur ces zones complexes de stratigraphie difficile, est que l'ancienne «nappe de l'Embrunais» de HAUG doit être divisée en plusieurs zones tectoniquement bien distinctes; et que la corrélation tectonique avec les Médianes n'en concerne qu'une petite partie (subbriançonnaise

s.str.), alors que la zone plus externe des Brèches de Tarentaise se poursuit seule dans la zone nordpennique de Sion (domaine valaisan de TRÜMPY 1955). Autrement dit, cette rectification des corrélations franco-suisses faisait monter la prolongation en Suisse des zones équivalentes aux Médianes du Nordpennique dans le Pennique moyen; ce qui les mettait en accord avec le résultat des révisions concomitantes de la tectonique des Grisons, et avec la conclusion d'ELLENBERGER sur les lambeaux mésozoïques pincés dans le Grand St-Bernard.

3. Remarques

a) Bien entendu, cette heureuse convergence d'opinion sur les grandes lignes n'empêche pas que de nombreux points restent encore à préciser. L'élaboration de solutions plus détaillées ne pourra résulter que d'une étroite collaboration entre les géologues travaillant dans les Préalpes et dans les diverses «zones de racines» au S du front pennique. Voici un exemple:

Les Préalpes médianes montrent un changement graduel de faciès de l'intérieur (plateforme avec série lacunaire) vers l'extérieur (bassin avec série continue et plus épaisse; cf. fig. 3). La similitude stratigraphique avec le Briançonnais, effectivement très frappante, concerne la partie interne des Médianes. De cette corrélation aujourd'hui indiscutée, on a pris l'habitude de déduire celle des zones de faciès qui les bordent à l'extérieur, soit de la *partie externe des Médianes* avec le *Subbriançonnais s. str.* des Alpes françaises.

Or, pour ce que nous en connaissons, la similitude des faciès du Subbriançonnais et des Médianes externes est beaucoup moins systématique; et, par endroits et au moins pour le Jurassique, les analogies des terrains subbriançonnais vont plutôt vers les faciès de l'Helvétique interne (Wildhorn ou Ultrahelvétique, avec en plus des influences locales de la plateforme nordpennique) que vers les Préalpes médianes. GAGNEBIN & PETERHANS (1927) firent la même remarque pour le Crétacé (justifiant ainsi leurs réserves à l'égard des solutions plus ou moins courtes de l'enracinement des Médianes). On a l'impression que le bassin subbriançonnais fut, pour certaines de ses parties et à certaines époques, envahi depuis le S par une sédimentation d'affinité helvétique interne; ce qui pourrait démontrer une connexion méridionale entre les bassins helvétique et subbriançonnais, et par conséquent que le pincement de la zone des Brèches de Tarentaise au S de Moutiers est bien originel. L'approfondissement de ces problèmes demande une étude détaillée de stratigraphie comparée entre toutes ces régions, sans oublier les klippes de Savoie (où certains terrains ont autrefois été disputés entre l'Ultrahelvétique et le Subbriançonnais; cf. ROSSET et al. 1976). En tout cas, la paléogéographie de la zone subbriançonnaise, ce sillon curieusement enserré entre deux plateformes (cf. ANTOINE 1972) et influencé par leurs évolutions contrastées, était certainement fort différenciée. Cet exemple montre les *risques d'ambiguïté et même de confusions que peut entraîner l'usage, hélas trop fréquent, d'un même terme pour désigner indifféremment une zone tectonique et un domaine de faciès.*

b) L'heureux aboutissement de la controverse sur l'origine des Préalpes démontre *ipso facto* la remarquable *continuité longitudinale,* à l'échelle d'au moins 500 km et pendant plus de 100 Ma, de domaines paléogéographiques de premier ordre tels que la plate-forme briançonnaise. Cette continuité est bonne à souligner dans la mesure où, au fort de la controverse, plusieurs auteurs avaient cherché à échapper aux contradictions apparentes entre les corrélations stratigraphiques et les corrélations géométriques en préconisant une paléogéographie discontinue, fondée sur l'échelonnement de domaines beaucoup plus courts, disposés «en festons». Nous sommes conscients que cette affirmation de continuité doit aussitôt être nuancée; mais c'est par rapport à elle que les observations sur les relais à très grande échelle d'un domaine par un autre, sur l'évolution longitudinale des faciès et la compartimentation interne des bassins (cf. notre remarque sur la zone subbriançonnaise), ou

sur l'obliquité des lignes structurales successives, prennent toute leur signification. Notons bien le rôle infiniment précieux des Préalpes (et leurs petites sœurs les klippes de Suisse centrale) pour ces reconstitutions à grande échelle; elles sont un maillon essentiel dans les corrélations des Alpes françaises aux Grisons à travers la culmination simplo-tessinoise.

c) Au cœur de toute cette controverse se trouvait l'important problème de la *valeur des corrélations tectoniques basées sur les analogies de faciès.* L'hypothèse de la paléogéographie discontinue réduisait cette valeur à peu de chose, mais le postulat de continuité ne permet pas non plus de lui accorder une confiance aveugle. D'une part l'histoire montre que beaucoup de géologues alpins ont sous-estimé la valeur de guide tectonique de certains faciès caractéristiques, p.ex. les dépôts littoraux et continentaux du Lias et du Dogger briançonnais. Mais, d'autre part, on connaît aussi de nombreux cas où des faciès semblables se déposèrent à la même époque dans des zones non équivalentes: ils occupaient des positions semblables dans des domaines différents. Un bon exemple est celui des brèches polymictes sous-marines, sédiments engendrés dans des zones de tectonique synsédimentaire active et qu'on retrouve au Jurassique dans plusieurs domaines bien distincts de la chaîne (TRÜMPY 1960); leur homologation hâtive a causé mainte corrélation incorrecte.

Un autre exemple est offert par les associations «eugéosynclinales» à radiolarites et roches vertes, dont on trouve dans les Préalpes des lentilles dans la zone submédiane et dans la nappe supérieure des Gets, et pour la provenance desquelles on a le choix entre 2 ou probablement 3 sillons ophiolitiques: valaisan, piémontais et ligure (= Canavese).

Le problème se pose encore aujourd'hui. Ainsi l'attribution classique de la zone de Sesia à l'Austroalpin repose surtout sur les analogies de faciès de leurs couvertures (avec brèches, etc.): en l'état de nos connaissances, cette corrélation ne nous paraît pas prouvée, et nous l'estimons même assez douteuse (cf. BADOUX 1969, TRÜMPY 1976). Or ce problème est en étroite relation avec celui des connexions paléogéographiques de la nappe de la Simme; on mesure ainsi toute l'étendue des incertitudes qui subsistent.

4. La nappe de la Brèche

Ces considérations nous amènent justement à la *nappe de la Brèche,* dont la patrie n'a pas encore pu être déterminée par une comparaison directe de faciès avec les couvertures penniques. Mais tous les travaux récents confirment la vraisemblance du schéma paléogéographique de SCHARDT (fig. 3): la Brèche tire son origine d'un bassin situé immédiatement au S du haut-fond d'où provient la partie interne des Préalpes médianes (CHESSEX 1959, TRÜMPY 1955). Comme les résultats cités plus haut (RENZ, ELLENBERGER, etc.) permettent d'identifier ce haut-fond au domaine briançonnais, lui-même lié à la nappe du Grand St-Bernard, il en découle que la Brèche prit naissance sur la bordure N de la fosse des schistes lustrés piémontais. Cette conclusion est corroborée par certaines analogies sédimentologiques et stratigraphiques entre le Jurassique de la nappe de la Brèche et les séries «prépiémontaises», qui, à la même époque, se déposaient dans les Alpes franco-italiennes à la limite des domaines briançonnais et piémontais; leurs caractères peuvent aussi

s'interpréter par des écroulements d'escarpements de failles sous l'effet d'une paléotectonique vigoureuse (LEMOINE 1961, ELTER 1972).

Au moment où nous allons mettre sous presse, BEARTH (1976) vient de décrire sur la transversale Valais-Préalpes une série bréchique d'âge présumé jurassique dans la position «prépiémontaise» où on doit s'attendre à trouver la patrie de la nappe de la Brèche. Située dans les schistes lustrés de Zermatt (zone du Combin), elle se rattache probablement à la couverture du Mont Rose.

E. Les Préalpes, couvertures chassées par la collision des continents

En conclusion, notre historique montre que les 40 années qui suivirent la victoire des nappes furent pour la géologie des Préalpes une période très active, orientée vers l'exploitation et la mise au point des principes énoncés par SCHARDT et LUGEON. Si les Préalpes s'affirmèrent alors comme une région clé pour poser et discuter certains grands problèmes de la géologie des Alpes, en revanche on n'y vit plus naître des nouveautés conceptuelles susceptibles de rayonner hors du domaine alpin: de toute évidence, il fallait poursuivre en détail la réinterprétation des données anciennes et surtout amasser des données neuves avant de songer à lancer de nouvelles grandes idées de portée générale.

D'autre part, nous avons vu que les principales questions posées par les Préalpes ne purent pas être résolues de manière satisfaisante pendant cette période, et nous avons dû anticiper dans notre historique pour montrer quelles réponses on leur apporte de nos jours. On ne s'étonnera donc pas que les géologues étrangers aux Alpes occidentales, faute de pouvoir se reposer sur un schéma sûr, aient eu bientôt de la peine à suivre la discussion de problèmes caractérisés par la complexité croissante des données et par l'incertitude constante des solutions. Aussi, alors même que les concepts inventés par SCHARDT et LUGEON poursuivaient une brillante carrière dans la plupart des chaînes du globe, l'intérêt général se détourna quelque peu des montagnes où ils étaient nés; et pendant que s'estompait le souvenir des luttes sur l'existence des nappes, les yeux se tournaient vers d'autres territoires d'où provenait une nouvelle génération de concepts originaux.

Or dans le domaine central de la chaîne alpine, le Pennique, travaillait EMILE ARGAND (1879–1940), élève de LUGEON. Depuis la découverte des nappes, peu de théories ont soulevé, dans les Alpes, d'aussi vives passions que celles d'ARGAND; tantôt portées en triomphe, tantôt clouées au pilori, elles ont en tout cas servi pendant un demi-siècle de référentiel par rapport auquel se situent les savants que tentent les grandes synthèses alpines. Aujourd'hui, il est vrai que la tectonique «argandienne» nous apparaît comporter quelques sérieuses faiblesses, surtout dans ses excès, dans sa volonté implacable et exagérée de ramener tous les phénomènes alpins, du Trias à nos jours, aux conséquences d'un seul mécanisme unificateur: l'affrontement N–S des plaques continentales de l'Europe et de l'Afrique. Il est donc normal qu'on lui découvre, comme chez certains disciples modernes, les défauts inhérents aux théories trop unitaires, donc trop schématiques. Mais il n'en est pas moins vrai que, sur le plan régional, les reconstitutions «argandiennes» forment toujours le squelette de nos idées actuelles, tandis que sur le plan conceptuel ARGAND apparaît de plus en plus comme le génial précurseur des théories «globales» de la tectonique moderne. Les exposer sortirait de notre propos. Nous n'en

parlerons ici que dans la mesure où elles affectent le sujet de cet article. Car, par un juste retour des choses, ARGAND, qui appliquait aux Alpes penniques une théorie née dans les Préalpes, y fit grâce à elle des découvertes qui éclairèrent à leur tour les Préalpes d'un jour nouveau.

A la recherche d'un moteur capable d'expliquer la genèse des puissantes nappes de socle dont il avait extrapolé la géométrie jusque dans le tréfonds de la chaîne, ARGAND fut conduit à développer l'idée, pressentie par LUGEON (cf. p. 545) et TERMIER, d'une gigantesque contraction du domaine alpin, dépassant tout ce qu'on croyait habituellement possible. En 1916, il explique le «déferlement» des nappes par «le rapprochement des môles anciens de l'Eurasie et de l'Indo-Afrique». Les particularités des Alpes résultent de la pénétration d'un «promontoire» de l'Afrique dans le dispositif de l'Eurasie. Comprimés par l'affrontement des continents comme «entre les deux mâchoires d'un étau», les sédiments de la Téthys en furent expulsés et donnèrent les nappes. Les Préalpes apparaissent ainsi comme le produit du débordement sur l'avant-pays européen des couvertures chassées par le rapprochement de l'Afrique et de l'Europe. Ou, comme le dit GAGNEBIN (1942) en commentant son collègue, les Préalpes sont «un surplus de matière, débordant de l'auge comprimée entre les deux serres de l'étau».

Or l'année même où ARGAND prononçait son discours «Sur l'arc des Alpes occidentales», WEGENER (1915) publiait la première édition de son livre sur sa géniale théorie de la dérive des continents. Inutile d'insister sur la convergence entre les idées des deux hommes. WEGENER faisait passer les translations concevables à la surface de la Terre de l'échelle de la centaine à celle du millier de km ou même plus, juste au moment où les travaux d'ARGAND montraient que les déplacements nécessaires pour créer l'empilement des nappes dans les Alpes excédaient manifestement les possibilités de la vieille théorie, devenue presque un dogme, de la contraction thermique.

Tandis que la théorie de la dérive suscitait presque partout une levée de boucliers, ou à tout le moins une extrême méfiance, ARGAND vit tout le parti qu'il pouvait en tirer pour inscrire ses conceptions sur l'origine des Alpes dans un cadre mobiliste global.

ARGAND développa donc à fond les implications tectoniques de la dérive des continents. Dans sa «Tectonique de l'Asie» (1924), c'est toute la chaîne alpino-himalayenne qu'il nous montre résulter de la collision de la plaque continentale de l'Eurasie avec les fragments éclatés de la Gondwanie. Et si, dans l'Himalaya, ce sont les Indes qui s'enfoncent par «sous-charriage» sous le continent asiatique, dans les Alpes, au contraire, «l'Afrique est montée sur l'Europe»[10]), et les nappes austroal-

[10]) Pour bien comprendre ARGAND, il ne faut pas oublier que, pour lui, l'Italie et le pays dinarique, et par conséquent l'Austroalpin (auquel nous avons vu qu'il attribuait, de façon exagérée, une grande partie des Préalpes), appartiennent à la Gondwanie, donc à l'«Afrique». On sait que les auteurs modernes cherchent à rendre compte de l'extrême complexité des Alpes et autres chaînes méditerranéennes en adjoignant au jeu «argandien» des deux grandes plaques européenne et africaine celui de plusieurs microplaques intermédiaires, sur le nombre et la disposition desquelles l'accord est encore loin d'exister. Quoi que la géologie de l'avenir décide à propos du rattachement de l'Italie ou ses parties à la même plaque que l'Afrique, il faut souligner qu'ARGAND avait clairement vu le point essentiel: la Méditerranée s'est formée tardivement, après la cicatrisation de la Téthys, par des distensions et des rotations qui ouvrirent des bassins neufs à cheval sur les anciennes limites des continents.

pines «n'en sont que le saillant le plus avancé ... C'est ainsi que se marque, des abords de Vienne aux Grisons, et plus loin dans les Préalpes supérieures, visibles à l'horizon de Berne, de Neuchâtel, de Lausanne et de Genève, la superposition de l'Afrique à l'Europe»!

Mais ARGAND se penche aussi sur l'origine des géosynclinaux. Il nous apprend qu'ils sont nés de l'écartement, de la disjonction des blocs continentaux, bien avant l'époque de leur rapprochement et de leur collision. Et il introduit une série de concepts très importants, sur la tectonique de traction pendant la sédimentation géosynclinale et sur l'interprétation des ophiolites, concepts négligés à l'époque mais qui reviennent en force depuis une dizaine d'années:

«Un géosynclinal résultera en général d'une traction horizontale qui étire le radeau de sal. L'étirement est d'abord plus aisé dans les profondeurs du sal que dans les hauts, où peuvent naître des fissures d'extension. En s'amincissant, le sal descend et se creuse: l'affaisement inhérent à la fonction géosynclinale n'est donc ... que l'effet vertical d'une distension horizontale ... Jusqu'à compensation, le sima monte sous le sal aminci: ce jeu rend compte de la fréquente association de roches vertes à des sédiments bathyaux. Le mélange des derniers avec des dépôts de moindre profondeur se fait par des glissements sous-marins sur déclivité ...

La traction continue-t-elle ..., le sal finit de s'étirer et le sima apparaît au fond de l'alvéole. Sur les diamètres où cela arrive, la condition géosynclinale fait place à la condition océanique; si le fait se généralise, il n'y a plus qu'un océan ...

Le jeux géosynclinal ordinaire est donc, dans son principe, un tronçonnement lenticulaire incomplet du continent; quand le tronçonnement est complet, la condition océanique apparaît» (1924, p. 299).

Si on veut des informations sur ces phénomènes, il faut aller les chercher dans les couvertures sédimentaires qui se déposaient au fond du géosynclinal naissant et sur ses seuils géanticlinaux. Or les Préalpes sont précisément formées de l'empilement de ces couvertures, chassées du centre de la chaîne par le rapprochement des continents et mises grâce à cela à l'abri des plus grosses déformations. Elles doivent donc constituer un excellent terrain pour l'étude précise du jeu géosynclinal exposé par ARGAND. Cette direction de recherches fut presque entièrement négligée par ses contemporains, à la décharge desquels il faut relever qu'ils ne disposaient pas des outils affinés qui font le succès des études actuelles sur ce sujet. Mais surtout l'élucidation de la tectonique alpine leur paraissait un objectif prioritaire sur celle de la paléotectonique téthysienne: une fois comprise l'origine des montagnes actuelles, on pourrait ensuite s'attaquer avec de meilleures armes à celle de l'océan dont elles prirent la place. D'autant plus que, comme on va le voir, il restait encore beaucoup à découvrir sur l'origine des montagnes.

V. 1940–1946: la tectonique de gravité et la diverticulation

A. Considérations historiques

1939–40. A l'heure où éclate la guerre mondiale, un nouveau remou agite la géologie alpine: le concept de *glissement par gravité* s'impose en tectonique des nappes, grâce aux travaux convergents de deux écoles, celle de Grenoble dans les nappes de flysch de l'Ubaye–Embrunais, et celle de Lausanne dans les Préalpes.

Dans l'Embrunais, l'idée de l'écoulement gravitatif semble issue de la thèse de SCHNEEGANS (1938) et fut principalement développée par GIGNOUX (1942 et 1948). Dans les Préalpes, nous retrouvons comme principal artisan LUGEON, alors âgé de 70 ans: après quelques communications préliminaires (1940*a* et *b*; LUGEON & SCHNEEGANS 1940), il développe à fond ce concept dans un mémoire écrit avec son fidèle élève et collaborateur ELIE GAGNEBIN (1941). C'est ce travail que nous analyserons brièvement ici. Son retentissement fut considérable; aussi ses auteurs sont-ils souvent considérés comme les pères de cette forme de tectonique qui, après la guerre, exerça une grande influence sur les interprétations géologiques dans beaucoup de chaînes de montagnes. Pourtant, on le sait, l'idée n'était pas neuve; ce qui était nouveau, c'était la méthode de démonstration, et certaines conséquences que l'état d'avancement de la géologie alpine permettait d'en tirer.

L'idée de la gravité comme moteur tectonique est aussi vieille que la géologie. Nous avons vu (II. *B*) que dès la première description de plis dans les Préalpes, DE RAZOUMOWSKY (1784) chercha à expliquer leur origine par la force de gravité. Un siècle plus tard, lorsque SCHARDT découvrit les nappes, il pensa aussitôt au «mécanisme d'une grande nappe glissant sur une masse de détritus, ou du terrain plastique (gypse, etc.) surtout si l'on admet une certaine pente, déterminant presque un mouvement spontané sous l'action de la pesanteur» (1893); et il en souligna les conséquences pour la recherche des racines, puisqu'il se peut que «la zone entière ayant glissé, il ne reste plus rien de la nappe dans le gisement primitif» (1900, p. 164).

Pendant les 40 années qui suivirent, le moteur gravitatif fut négligé par la plupart des tectoniciens alpins. Les raisons en sont complexes. Pour une large part, certainement, cet abandon découle de la conception d'une tectonique des nappes systématiquement ductile et profonde qui fut préconisée avec beaucoup d'autorité par LUGEON au début du siècle (cf. p. 544); il est piquant de constater qu'en 1940, LUGEON remanie spontanément (et avec autant d'autorité qu'en 1902 ...) une pièce importante de la doctrine tectonique qu'il avait lui-même imposée à la géologie alpine 40 ans plus tôt! C'est assurément un cas rare dans l'histoire de la science.

D'autre part, confrontés aux puissantes nappes de socle révélées par ARGAND dans les tréfonds des Alpes et aux énormes raccourcissements crustaux qu'elles impliquaient, les géologues avaient à juste titre le sentiment qu'une chaîne de montagnes devait être, fondamentalement, bien autre chose qu'un grand glissement de terrain; seuls des refoulements (au sens de DE SAUSSURE et de BERTRAND) d'origine profonde paraissaient capables de bousculer ainsi la croute terrestre dans toute son épaisseur. L'idée de glissement par gravité ne disparut pourtant jamais complètement de la tectonique des nappes; elle fut notamment illustrée par les géologues italiens qui travaillaient dans les Apennins, beau pays de nappes gravitatives s'il en est (cf. DAL PIAZ 1942).

Il faut ajouter que, dans le monde de la géologie alpine, le concept de nappes de gravité fut desservi par les affabulations de quelques théoriciens qui le préconisaient sous des formes si unilatérales et simplistes, si déconnectées des observations naturelles, voire sur bien des points contredites par elles, que les praticiens des réalités tectoniques ne se sentaient guère enclins à leur accorder un grand crédit. D'autant que, chez certains géophysiciens hostiles à la dérive des continents, le

glissement gravitatif n'était invoqué que dans le seul but de minimiser les raccourcissements de la croute, là où l'existence même des nappes ne pouvait pas être niée sans une mauvaise foi trop évidente.

B. Le glissement gravitatif des nappes préalpines

Toute autre était la démarche de LUGEON & GAGNEBIN (1941). Rompant avec les spéculations simplifiantes de théoriciens qui n'hésitaient pas à violenter la réalité pour y induire un modèle préfabriqué, ils leur substituèrent une démonstration qui prenait racine dans la complexité même des faits révélés par l'observation attentive et patiente de la nature. Bien convaincus de la nécessité d'une tectonique de type «argandien» pour les étapes essentielles de l'édification de la chaîne, ils montrèrent seulement qu'elle n'expliquait pas tout, et que, dans les Préalpes en particulier, il fallait la compléter par des translations gravitatives. L'étroite liaison qu'ils établissaient entre les faits et la théorie explique l'impact du mémoire de LUGEON & GAGNEBIN, qui de plus tombait au bon moment, en même temps qu'un de ces retours de pendule qui affectent périodiquement la fortune des doctrines scientifiques. Ajoutons que ces auteurs, de même que GIGNOUX et son école dans les Alpes françaises, surent renouveler cette vieille idée en la présentant d'une manière qui ouvrait des perspectives stimulantes et l'érigeait en un tremplin pour de féconds développements. Nous en verrons plus loin un exemple avec la diverticulation.

Toutefois la complexité extrême de la région traitée par LUGEON & GAGNEBIN avait accummulé sous leurs pas des embuches qu'ils ne purent pas toujours éviter. La synthèse régionale qu'ils ont tentée était, à cette époque, encore prématurée, et les travaux récents n'ont pas confirmé toutes leurs «vues nouvelles». Ainsi on trouvera dans ce colloque une réfutation d'un aspect important de leur schéma structural (WEIDMANN et al. 1976). D'autres aspects, au contraire, tels que la subdivision des Préalpes médianes en deux ensembles tectoniquement indépendants, les Plastiques et les Rigides, ont été non seulement confirmés, mais encore étendus et développés par les travaux récents (BAUD 1972, SEPTFONTAINE & LOMBARD 1976).

Or c'est justement cette subdivision qui fournit à LUGEON & GAGNEBIN un de leurs arguments essentiels en faveur de la dynamique gravitative. Nous décomposerons leur raisonnement en 3 étapes logiques:

1. *La géométrie.* Nos auteurs montrent que la partie interne des Médianes est formée de tronçons, d'une longueur de 1 à plus de 20 km, isolés entre eux et du gros de la nappe par des flysch appartenant à diverses autres unités (fig. 5 et 6); ces grandes dalles calcaires ressemblent ainsi à des «épaves» flottant ou nageant dans une mer de flysch (selon le mot de JACCARD 1908). Leur style tectonique essentiellement faillé leur valut le nom de *Rigides,* par opposition aux *Plastiques* bien plissées qui forment le gros de la nappe. La limite paléogéographique entre la plateforme briançonnaise et le bassin subbriançonnais se situe à l'intérieur des Plastiques (cf. BAUD 1972); et la continuité des faciès briançonnais, du bord interne des Plastiques aux Rigides externes, montre bien que, en dépit de leur actuelle séparation tectonique, ces éléments étaient originellement cohérents (1941, p. 49).

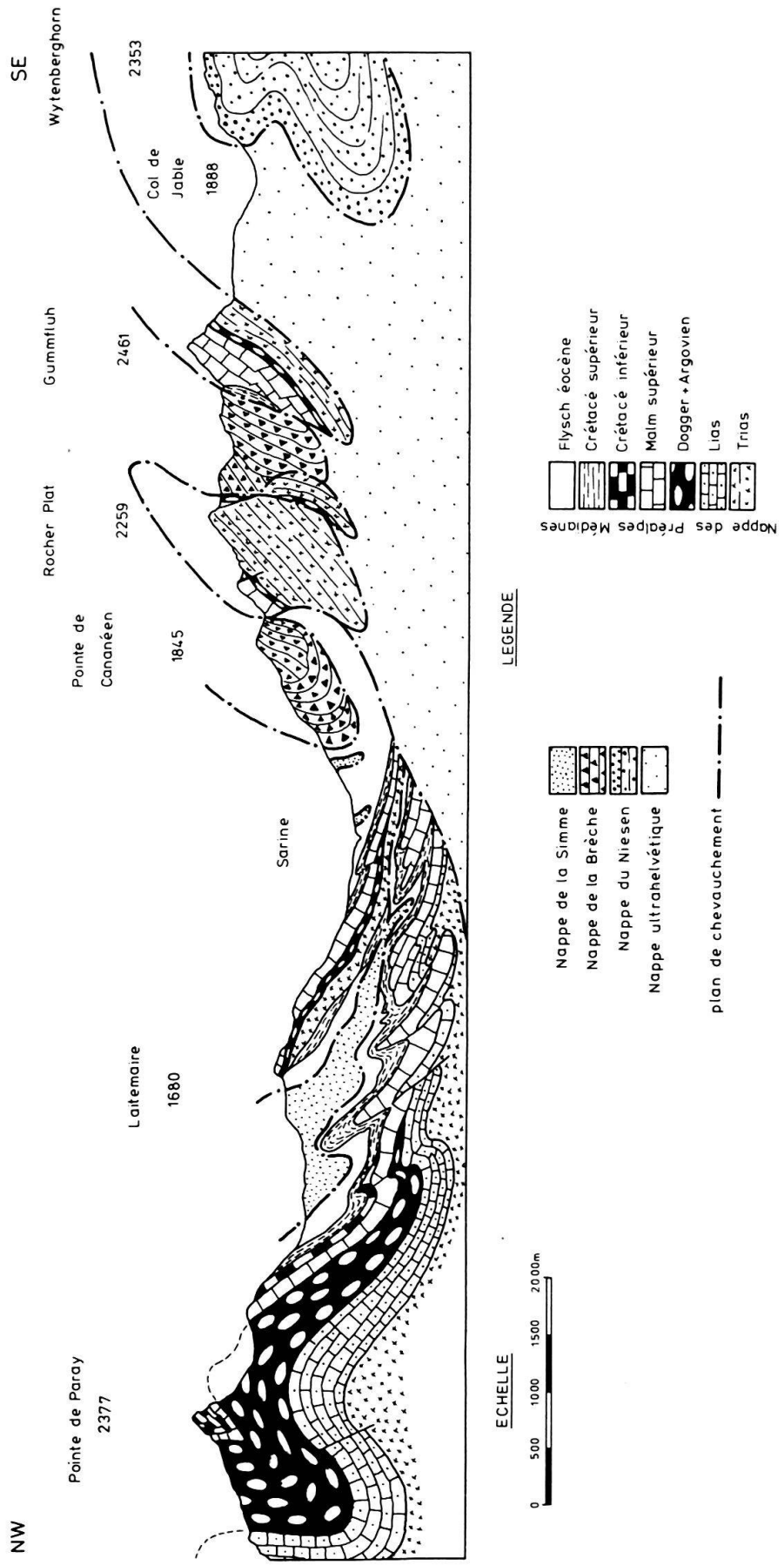


Fig. 5. Coupe tectonique de la partie interne des Préalpes médianes, redessinée d'après GAGNEBIN (1942).

Cette coupe illustre la conception de LUGEON & GAGNEBIN, et montre les écailles de «Rigides» (Gummfluh, Rocher Plat, et Laitemaire) coupées des «Plastiques» (Pointe de Paray). Notons aussi les têtes anticlinales plongeantes de la nappe de la Brèche, dont l'étude au 19e siècle avait mis SCHARDT sur la voie de la découverte des nappes (cf. fig. 2).

Parmi les modifications qu'il faut apporter aujourd'hui à cette coupe, signalons le rattachement à la nappe de la Simme (s.l.) de la plus grande partie du flysch anciennement attribué aux Médianes, et le rattachement de la région du Col de Jable à la zone submédiane.

2. *La cinématique.* Cette géométrie étant admise, il s'agit de reconstituer le mouvement de ces éléments. Le point crucial est que LUGEON & GAGNEBIN déduisent de l'ensemble de leurs observations que la fragmentation des Préalpes médianes résulte d'une disjonction précoce par extension, liée au mouvement de la nappe.

«Lors de la marche en avant des Médianes, la masse des Plastiques s'est détachée du reste, laissant en arrière les Rigides. Plus tard celles-ci, partiellement recouvertes par la nappe de la Brèche et s'avançant à leur tour, ont débordé sur le territoire des Plastiques et l'ont quelque peu chevauché» (1941, p. 49).

Autrement dit, *les Préalpes médianes ont avancé coupées de leurs racines.*

3. *La dynamique.* Dans ces conditions, il n'est plus possible de pousser la nappe de l'arrière. En outre, le tronçonnage par extension montre que la nappe a été soumise à une traction, incompatible avec une tectonique de poussée. Le mouvement de la nappe ne peut donc résulter que d'une *force de volume agissant à distance: la gravité.*

La simplicité apparente de cette démonstration, telle que nous la présentons ici en regroupant des éléments disséminés au long du texte de LUGEON & GAGNEBIN, ne doit pas faire croire que les choses sont en réalité si faciles. Déjà la détermination de la géométrie actuelle pose toutes les difficultés inhérentes au *passage d'observations de surface à une reconstitution de volumes.* La séparation tectonique des Rigides fut d'abord proposée par JACCARD (1908) dans la région Rubli-Gummfluh, puis refusée par des auteurs qui rétablirent la liaison souterraine; réhabilitée avec des arguments détaillés par LUGEON & GAGNEBIN (1941), qui l'étendirent à toutes les Préalpes romandes, cette conception fut de nouveau contestée dans les années 60; finalement, elle est pleinement rétablie et développée par les analyses stratigraphiques minutieuses de BAUD (1972), et étendue aux Préalpes du Chablais par SEPTFONTAINE & LOMBARD (1976).

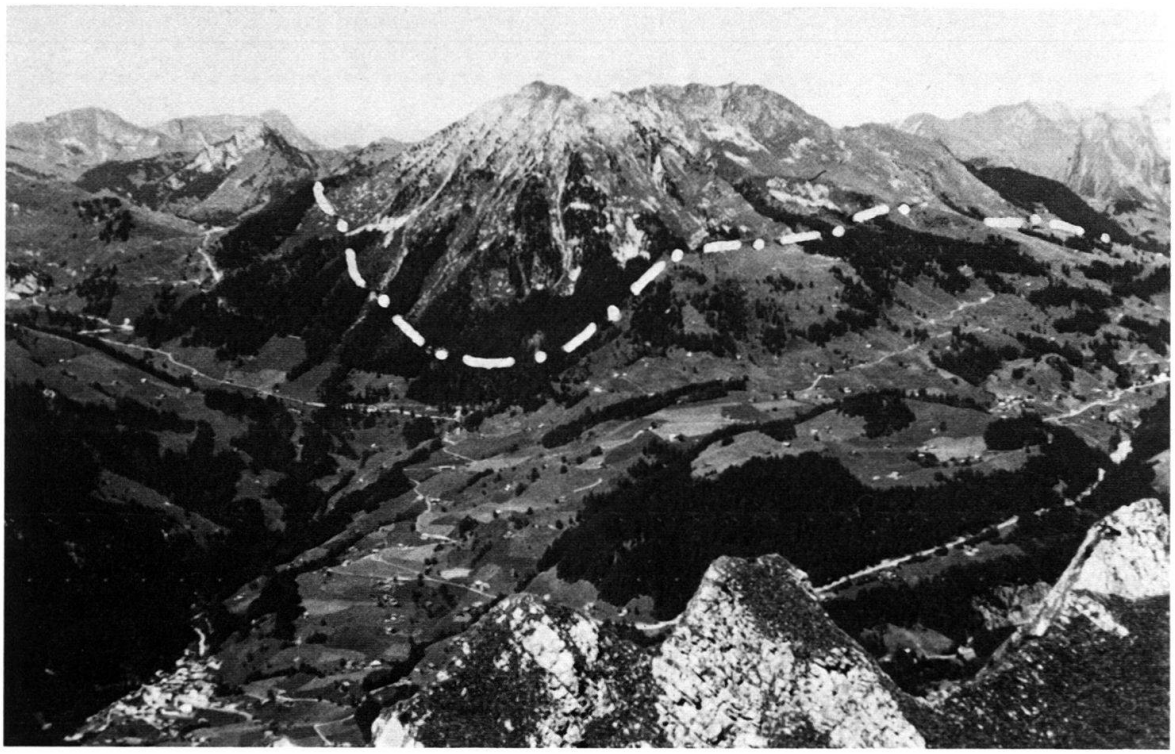


Fig. 6. L'écaille de Trias du Mont d'Or, dans les Préalpes romandes. Exemple d'une «épave» des Préalpes médianes rigides.

Le passage à la cinématique est bien plus hasardeux. LUGEON & GAGNEBIN attribuaient la fragmentation des Rigides à des disjonctions par traction et des érosions pendant la marche de la nappe. Aujourd'hui, on tend à reculer dans une large mesure la date de ces disjonctions à l'époque du décollement même de la nappe, et celle des érosions à une date encore plus ancienne. Ces ajustements n'altèrent pas la conclusion du raisonnement, si on met l'accent sur la précocité de la coupure entre la nappe et sa racine (l'argument le plus fort à nos yeux), plutôt que sur la traction et l'érosion (qui jouaient le premier rôle dans l'argumentation de LUGEON & GAGNEBIN).

Enfin, on pourrait envisager que les Médianes, puisqu'elles ne peuvent pas être poussées de l'arrière, ont été entraînées passivement par une nappe active sus-jacente. En l'occurrence, le contexte géologique rend cette alternative, que LUGEON & GAGNEBIN ne s'étaient guère souciés de réfuter, très peu vraisemblable.

Ajoutons que toute cette argumentation concerne essentiellement la dernière étape du transport des Médianes, celle qui les vit arriver dans leur position actuelle; mais les étapes antérieures de cette translation posent des problèmes dynamiques beaucoup plus difficiles et encore non résolus. La place nous manque pour discuter ces questions de façon plus approfondie, mais nous les mentionnons pour souligner l'extrême complexité de ce type de reconstitution dynamique.

A cet argument essentiel, LUGEON & GAGNEBIN en ajoutaient d'autres: la tendance des nappes à remplir les creux (perte de potentiel gravifique); et l'impossibilité mécanique, pour certaines nappes minces et constituées de terrains ductiles, de transmettre des contraintes sans céder. En revanche, il est curieux que nos auteurs ne mentionnent pas un argument très intuitif, qui avait beaucoup frappé SCHARDT, et qui a été employé souvent depuis lors: l'existence d'une série continue de termes de transition entre les nappes et des éléments exotiques de la taille des blocs, manifestement mûs par la gravité. Mais en 1943, LUGEON développera aussi cet argument avec la diverticulation.

En dépit des nombreuses réserves de détail qu'on peut émettre sur divers points de la reconstitution de LUGEON & GAGNEBIN, leur travail restera une tentative remarquable de *déduire une dynamique d'observations géométriques.* A cet égard, leur essai revêt à nos yeux une valeur exemplaire et représente une contribution importante aux progrès de la tectonique.

Il serait hors de notre propos de suivre l'histoire de cette théorie dans d'autres régions des Alpes et surtout dans d'autres chaînes de montagnes, où l'écoulement gravitatif des nappes devint très à la mode dans les années 1950 et 1960. Nous n'ajouterons qu'une dernière remarque: beaucoup de géologues tirèrent argument de l'existence des nappes de gravité pour nier la tectonique «argandienne» et les dérives continentales. LUGEON & GAGNEBIN ne cédèrent jamais à cette illusion; pour eux, l'écoulement des nappes superficielles n'était qu'un mécanisme complémentaire et amplificateur des compressions de socle:

«On voit donc qu'il peut exister trois types de nappes:

1. Nappes actives dues à la dérive continentale.
2. Nappes mi-passives dues à l'entraînement par frottement de ce qui se trouve sous les nappes actives ...
3. Nappes passives dont une partie est activée par poussées dépendant de la dérive primaire des nappes actives, l'autre partie formée par le glissement par gravité» (LUGEON, manuscrit inédit de 1943).

«Aujourd'hui, nous envisageons plusieurs mécanismes différents, complémentaires. Pour les grandes nappes penniques ..., la compression du géosynclinal par poussée latérale, par dérive du socle africain. Pour le surplus de matière qui a débordé le cadre du géosynclinal, écoulement lent sous l'effet de la pesanteur. Il faudrait ajouter encore l'action des mouvements isostatiques provoqués par les surcharges que représente l'accumulation des nappes» (GAGNEBIN 1942).

«La tectonique d'écoulement n'est, en fait, qu'un complément à la tectonique classique. Elle ne s'exerce que sur un domaine restreint: le surplus de matière que les formidables compressions du centre de la chaîne ont fait déborder le cadre de l'auge géosynclinale» (GAGNEBIN 1945).

L'église se trouvait ainsi remise au centre du village par ceux-là mêmes qui l'avaient ébranlée en en montrant les limites. A la même époque, d'autres géologues alpins mirent aussi en garde contre un engouement excessif pour la «tectonique d'écoulement» (GOGUEL 1946, TERCIER 1950).

C. La diverticulation

L'Ultrahelvétique a toujours eu la réputation d'une zone d'une extrême complication. Cette complexité s'explique par une succession de dislocations, qu'on peut rattacher à au moins trois groupes principaux d'événements: (1) La mise-en-place de l'Ultrahelvétique lui-même, phénomène complexe que nous allons examiner plus en détail. (2) La mise-en-place des nappes helvétiques; rappelons que la postériorité de ces dernières fut établie par LUGEON (1902*a*), qui en montra les effets sur la structure de l'Ultrahelvétique (cf. p. 546). (3) Le passage des autres nappes préalpines par-dessus l'Ultrahelvétique; non seulement ce passage a profondément marqué la structure de l'Ultrahelvétique dans les Préalpes internes, mais il en a de plus entraîné de grandes écailles sur 30 km jusqu'au front des Préalpes. En soustrayant de la géométrie actuelle les effets des événements (2) et (3), on doit pouvoir remonter aux événements (1).

On se rendit vite compte (LUGEON 1902*a*) que l'Ultrahelvétique est constitué de plusieurs nappes plus ou moins enchevêtrées. Mais ce n'est qu'à travers les longues et patientes recherches de LUGEON et ses élèves, d'ARN. HEIM (1920), de HUBER (1933), et d'autres, que prit progressivement forme un schéma régional cohérent qui ramenait les innombrables écailles ultrahelvétiques à un petit nombre de nappes bien définies. En 1940, on avait ainsi dégagé quelques règles de ce chaos apparent:

(a) Les séries stratigraphiques des nappes ultrahelvétiques sont incomplètes et complémentaires. Par exemple, en nous limitant à quatre nappes et en simplifiant, la nappe de Bex contient du Trias et du Lias, celle d'Arveyes du Dogger, celle d'Anzeinde du Malm et du Crétacé inférieur, et celle de la Plaine Morte du Crétacé supérieur et du Tertiaire.

(b) Soustraction faite des déformations causées par les événements (2) et (3), les séries de ces nappes sont toujours normales.

(c) Mais ces nappes normales contiennent généralement des terrains d'autant plus anciens qu'elles sont plus élevées [toujours sous réserve des déformations (2) et (3)]; elles sont donc empilées dans l'ordre inverse de leur superposition originelle. Ainsi, des quatre nappes citées, Plaine Morte est à la base, surmontée par Anzeinde, puis par Arveyes, et enfin par Bex.

(d) Enfin, certains critères stratigraphiques (p. ex. la profondeur de la transgression du flysch) aident à repérer les positions originelles respectives des séries dans le bassin ultrahelvétique.

Tels sont les faits qu'il fallait expliquer. Ce furent les réflexions d'HÉLI BADOUX, qui préparait alors sa thèse dans les Préalpes internes sous la direction de LUGEON, qui amenèrent en 1943 une solution élégante à ce problème. Son principe réside dans le clivage, selon ses horizons les plus ductiles, d'une série initiale complète; emportées successivement par leur poids, ces tranches décollées (les diverticules) glissent les unes après les autres et se retrouvent finalement superposées dans l'ordre inverse du départ, certaines pouvant même jouer à saute-mouton. A ce chassé-croisé vertical s'ajoute un jeu horizontal qui peut aboutir à la juxtaposition ou même à l'interversion d'éléments issus de parties différentes du bassin. Cette explication cinématique impliquait une dynamique purement gravitative, dont l'idée venait justement de s'imposer dans les Préalpes. Et c'est sur ce mille-feuille gravitatif qu'agirent ultérieurement les déformations qui donnent à l'Ultrahelvétique toute sa complexité, d'abord par-dessous avec la mise-en-place des nappes helvétiques (LUGEON 1902*a* et 1940*b*), puis par-dessus avec le passage des autres nappes préalpines (BADOUX 1945, HOMEWOOD 1974).

L'élève ayant fourni les éléments de la solution, le maître créa le terme qui désigne dès lors ce mécanisme: la *diverticulation*[11]). Déjà âgé, LUGEON ne publia qu'une note préliminaire (1943). Un manuscrit beaucoup plus long et détaillé resta inédit. Il appartint alors à BADOUX de préciser l'utilisation de ce concept, ce qu'il fit après la poursuite de longues recherches sur le terrain par lui-même et ses propres élèves (1963*b* et 1967; BADOUX & LOMBARD 1962, p. 26–30).

Un des éléments les plus intéressants de la note courte mais dense de LUGEON (1943) est sa description du passage des phénomènes tectoniques aux phénomènes sédimentaires, et l'usage qu'il en fit pour expliquer la formation chaotique du wildflysch:

> «Il peut arriver que la diverticulation prenne un développement excessif. C'est ainsi que ce que l'on appelle la nappe de la Plaine Morte est formé par des diverticules de second ordre, qui se présentent comme des lames ou lentilles de Turonien ou de Maestrichtien, ces deux terrains étant toujours sans relations entre eux, lames perdues dans le Flysch et la plupart du temps dans le Wildflysch. Celui-ci serait lui-même l'exagération de la diverticulation, soit le produit de glissements» (LUGEON 1943).

En fait, les «diverticules de second ordre» de LUGEON correspondent exactement à ce qu'on a couramment appelé, plus récemment, des olistolites (FLORES 1955). LUGEON est encore plus net dans son manuscrit inédit; pour les distinguer des *diverticules majeurs* qui sont à l'échelle de la nappe, il les appelle *diverticules mineurs*, et donne comme exemple-type «les lames de Néocrétacé contenues dans l'unité Plaine-morte, elle-même diverticule majeur».

Il s'en suit que les écailles dont l'empilement constitue l'Ultrahelvétique résultent, le plus souvent, non pas du laminage tectonique de plis-failles, comme on l'a longtemps interprété, mais de disjonctions pendant un glissement gravitatif: «La disposition en lentilles serait donc originelle et non due à des actions mécaniques ultérieures» (LUGEON 1943). Dans son manuscrit inédit, LUGEON discute ce problème en détail et expose des situations où, en «tectonique classique», le raccord de

---

[11]) Le choix de ce terme n'était pas des plus heureux; dans l'une des rédactions de son manuscrit resté inédit, LUGEON envisage de le remplacer par le terme «dérupitation», que son étymologie latine très expressive rend bien préférable. Mais la diverticulation s'est imposée ...

deux écailles d'une même nappe ne pourrait se faire qu'à travers une autre nappe! Il en conclut:

«Quand on cherche à raccorder ces différentes unités tectoniques les unes avec les autres, on ne trouve pas de solution satisfaisante, à moins de faire intervenir des jeux de saute-mouton et des virtualités d'éléments ... C'est alors que se présente ainsi la démonstration de la dispersion originelle par gravité des diverticules ...»

Ces idées mirent du temps à s'imposer, mais sont toujours mieux confirmées par les recherches récentes (HOMEWOOD 1976, MASSON 1976).

LUGEON a donc insisté sur le glissement des diverticules ultrahelvétiques dans un bassin marin pendant la sédimentation du flysch. BADOUX a présenté un point de vue un peu différent, parlant d'une diverticulation plus tardive, plus purement tectonique, et à sec. A notre avis, cette divergence entre les deux pères de la diverticulation résulte de ce que le poids principal des recherches de chacun a porté sur des terrains différents. En l'état actuel de nos connaissances, il paraît plausible que les diverticules se soient déclanchés à la marge S du domaine helvétique sur une terre récemment émergée, peut-être encore sujette à des retours temporaires de la mer, dans un contexte de tectonique active (failles subcontemporaines à rejet hectométrique et érosion rapide, donc tremblements de terre probables); de là, le glissement les aurait emportés, en les fragmentant de plus en plus, dans le bassin marin adjacent où se déposait encore le flysch helvétique, à la sédimentation normale duquel leur arrivée aurait mis fin. En tout cas, il est aujourd'hui certain que ce phénomène a été beaucoup plus rapide et concentré dans le temps que ne l'envisageait LUGEON: dans les Préalpes internes, la diverticulation ultrahelvétique paraît cantonnée à la base de l'Oligocène. On peut y voir le contre-coup gravitatif, dans une ambiance de sismicité vigoureuse, des premiers plis causés par la contraction qui, en s'amplifiant, donna ensuite naissance aux nappes helvétiques.

Telle est la théorie de la diverticulation. On constate que ce développement si fructueux de la tectonique gravitative marque un retour, sous une forme beaucoup plus élaborée, à des conceptions fondamentalement proches de celles qu'avait autrefois énoncées SCHARDT. Mais il faut bien prendre garde que ses successeurs des années 1940–50 se trouvaient devant une situation qu'un demi-siècle de recherches actives avait rendue beaucoup plus complexe; l'accumulation, pendant 50 ans, d'une masse de données stratigraphiques et tectoniques nouvelles, imposait à toute tentative de théorie cohérente des contraintes bien plus nombreuses qu'à l'époque de SCHARDT. Et ce sera toujours plus le cas à l'avenir.

Mais il restait encore une difficulté à vaincre pour donner une solidité définitive à l'édifice: le *problème des racines,* qui fut résolu par BADOUX en 1946 (d'où le choix de cette date dans le titre de ce chapitre). On sait que LUGEON, au début du siècle, avait rattaché les nappes ultrahelvétiques à la nappe helvétique du Wildhorn par des synclinaux de raccord. Lorsqu'il développa l'idée de la diverticulation en 1943, il se rendit bien compte qu'il y avait une contradiction entre ces deux conceptions. Dans son manuscrit inédit, il consacre un chapitre spécial à l'analyse de ce problème; des réflexions du vieux savant s'échappent d'émouvants aveux d'impuissance: «J'avoue que quelque chose m'échappe ... Il y a dans tout cela un point faible ... Il se peut que les attaches que je crois avoir comprises ne soient pas les vraies ...» Cette incertitude est peut-être la raison pour laquelle il ne publia jamais

le manuscrit. N'étant plus en âge de reprendre toute cette affaire, il la confia donc à son élève, qui s'attaqua ainsi à la «zone des racines», région particulièrement difficile où les complications tectoniques abondent et où la forte déformation des roches rend souvent problématique l'identification des terrains.

Par une étude minutieuse, BADOUX (1946) put rétablir certaines attributions stratigraphiques incorrectes de LUGEON. Il montra ainsi que l'important «synclinal du Prabé» ne raccordait pas l'Ultrahelvétique à l'Helvétique, mais était en réalité un pli postérieur à la mise-en-place du premier sur le second. Les «racines» ultrahelvétiques se voyaient ainsi rejetées vers le S, dans la cicatrice séparant le front pennique de l'Helvétique[12]). Autrement dit la notion de racine s'évanouit pour les nappes ultrahelvétiques (ce qui est normal pour des nappes de gravité); on peut seulement dire que la zone radicale de la nappe du Wildhorn, largement cachée sous le Pennique frontal, tient simultanément lieu, pour une étape antérieure de la déformation de cette zone, de patrie des nappes ultrahelvétiques. Ainsi se trouvaient réconciliées la structure des racines helvétiques et la diverticulation.

Une dernière remarque pour conclure: par tous ces travaux, le concept même de nappe subissait une profonde évolution. Avec la dynamique gravitative, la notion classique de *racine* s'évanouissait, comme on vient de le voir, pour faire place à celle de *patrie*, selon le terme heureusement choisi par FALLOT (1956, p. 104). La première est très concrète et purement géométrique; la seconde est plutôt paléogéographique, et surtout plus abstraite, puisque la *dénudation tectonique* (GIGNOUX 1942 et 1948) ne laisse, après les recouvrements ultérieurs par des éléments plus internes, qu'une *cicatrice* (pour reprendre le mot également heureux de HAUG 1904).

On venait donc d'ôter aux nappes gravitatives leurs racines, voilà maintenant que la diverticulation leur supprime leur continuité. Qu'en reste-t-il? «Des abstractions commodes qui simplifient le langage et évitent d'introduire un nom particulier pour chaque diverticule» (BADOUX 1967). La *nappe* subsiste en effet en tant que concept utile pour classer des éléments allochtones isolés de même contenu stratigraphique, mis en place simultanément à partir de la même zone paléogéographique. Nous sommes loin des définitions des auteurs de la fin du 19e ou du début du 20e siècle ... Cet usage du mot nappe peut choquer, mais nous ferons remarquer qu'il existe toutes les transitions entre la nappe entièrement cohérente et l'amas de lentilles (les Préalpes médianes rigides représentent un cas intermédiaire); et que l'âge de la fragmentation d'une série cohérente en éléments isolés peut être variable, et de plus difficile à déterminer.

VI. Tendances récentes et vues d'avenir

La période récente de la géologie des Préalpes ressemble à celle de 1902 à 1940: recherche très active et en grande partie soustendue par la volonté d'appliquer et de perfectionner un concept qui venait de démontrer son efficacité, en l'occurence la tectonique de gravité. Il n'est pas question ici de donner un compte rendu de ces nombreux travaux. Nous nous bornerons à indiquer quelques tendances, et à relever

[12]) Ce dont des cartes tectoniques récentes tiennent encore insuffisamment compte, restant imprégnées de la notion traditionnelle d'une «zone des racines ultrahelvétiques».

certaines orientations qui nous paraissent particulièrement prometteuses. Nous sommes d'ailleurs bien conscient que le manque de recul limite notre objectivité.

a) La cartographie détaillée de larges secteurs des Préalpes (particulièrement BADOUX 1965*a* et *b*, BADOUX et al. 1960), complétée par des descriptions régionales minutieuses (BADOUX 1962), a apporté une multitude de données nouvelles et a notamment permis de préciser une tectonique qui se révèle toujours plus complexe.

b) Un gros effort a porté aussi sur la stratigraphie. De nombreux travaux précisent l'histoire mésozoïque des bassins. Des synthèses se dégagent (p.ex. BADOUX & MERCANTON 1962).

Les résultats les plus lourds de conséquences proviennent de l'application systématique de toutes les techniques de la micropaléontologie à l'étude des flysch, qu'on réussit enfin à dater correctement, ce qui n'alla pas sans surprises (p.ex. KLAUS 1953, BADOUX & WEIDMANN 1963). Rappelons que le mot flysch est un cadeau - légèrement empoisonné mais très pratique - de la géologie des Préalpes au langage scientifique international (STUDER 1827 et 1848). En dépit de leurs conditions d'affleurement généralement très défavorables, ces terrains ont été, par la force des choses, constamment au premier plan de l'attention des géologues préalpins, dont les recherches spécialisées ont donné lieu de temps à autre à des mises au point plus générales (TERCIER 1948, WEIDMANN 1967). A l'emploi intensif de la micropaléontologie dans l'étude des flysch s'est ajouté plus récemment celui des méthodes de la sédimentologie moderne, qui aident à en mieux définir les conditions de formation (p.ex. FLÜCK 1973, HOMEWOOD 1976, STUIJVENBERG et al. 1976).

c) Sur le plan tectonique, on compte toujours les nappes. Les recherches les plus actives ont porté sur l'Ultrahelvétique des Préalpes internes, où BADOUX (1963*b* et 1975) et ses élèves (GABUS 1958, GODEL 1965, HOMEWOOD 1974, MERCANTON 1963) poursuivirent l'œuvre de LUGEON, et sur les Préalpes supérieures, dont la tectonique profita très largement des progrès de la stratigraphie des flysch (CARON & WEIDMANN 1967, CARON 1972). La dernière née des nappes préalpines est celle du Gurnigel dans les Préalpes externes (CARON 1976). Nous comptons aujourd'hui dans les Préalpes une quinzaine de nappes principales ..., le tableau s'est bien compliqué depuis les trois nappes de SCHARDT.

L'un des problèmes tectoniques les plus discutés fut celui de l'origine de toutes ces nappes; et on sait que l'un des résultats les plus importants de la géologie alpine dans les années 1950-60 est d'être parvenue à un accord général sur la provenance des Préalpes médianes. En revanche, l'origine des Préalpes supérieures pose toujours des problèmes difficiles et controversés. Nous avons déjà traité ce «problème des racines» au chapitre IV et nous n'y reviendrons pas.

La masse énorme des informations accumulées sur les Préalpes depuis 30 ans laisse pressentir une nouvelle génération de synthèses et d'hypothèses. Ces synthèses seront-elles possibles dans le cadre des concepts actuels? Ou faudra-t-il introduire des concepts nouveaux, comme l'avaient fait SCHARDT et LUGEON? L'avenir répondra à cette question. En attendant, nous voulons souligner ce qui nous paraît être aujourd'hui la double vocation de la géologie des Préalpes:

1. D'une part, les Préalpes constituent un domaine privilégié pour les recherches de *paléogéographie et de paléotectonique alpine.* Leurs séries sédimentaires, qui ne doivent qu'à leur glissement vers l'extérieur de la chaîne d'avoir échappé à la destruction ou au métamorphisme, nous apparaissent comme un musée naturel où seraient conservés pour la Science, en désordre il est vrai, de précieux enregistrements sur l'origine et l'évolution des géosynclinaux alpins.

Cette direction de recherches, qui, dans un sens, concerne peut-être moins l'histoire des Alpes que celle de leur ancêtre la Téthys, bénéficie aujourd'hui non seulement des progrès de la stratigraphie et de la sédimentologie, mais encore des apports de méthodes telles que l'analyse structurale (BAUD & MASSON 1975) ou la géochronologie radiométrique (BERTRAND & DELALOYE 1976).

2. D'autre part, les Préalpes offrent un terrain de choix pour l'étude des *mécanismes de mise-en-place des nappes,* qu'on peut saisir ici dans toute leur complexité.

Il serait en effet trop simple de penser que le problème de la dynamique des nappes préalpines ait été complètement résolu par LUGEON & GAGNEBIN. Leurs arguments en faveur d'une dynamique gravitative, bien que très forts, concernent surtout d'une part l'Ultrahelvétique et les nappes supérieures, d'autre part la phase finale du transport des nappes intermédiaires (Médianes, etc.). On ne sait encore presque rien sur les premières étapes du mouvement de ces nappes.

Déjà au niveau de leur *cinématique,* la tectonique des nappes préalpines est encore pleine d'incertitudes. En plus des techniques géométriques d'analyse des déformations superposées, on a certainement beaucoup à attendre de la vieille méthode du recensement des galets des conglomérats synorogéniques. Les géologues savent depuis longtemps qu'en fouillant dans les amas de détritus déposés dans l'avant-pays, ils se renseignent sur ce qui se passait dans les montagnes en gestation. Des informations sur la marche des nappes ont déjà été tirées de l'étude des éléments des flysch nordhelvétiques (VUAGNAT 1952) et de la molasse subalpine (TRÜMPY & BERSIER 1954), mais il reste encore énormément à faire pour parvenir à une reconstitution précise de la cinématique des Préalpes.

Passant de la cinématique au niveau plus ambitieux de la *dynamique,* on doit s'attendre que l'analyse structurale minutieuse des décrochements contemporains du plissement (PLANCHEREL 1976) et la géothermie des inclusions fluides (MULLIS 1976) contribuent à renouveler les données du problème. Mais les informations les plus précieuses nous paraissent devoir provenir de l'étude détaillée des *semelles basales des nappes,* dont on rencontre dans les Préalpes plusieurs types bien distincts. L'un des plus caractéristiques est le *wildflysch,* ce faciès chaotique qui avait déjà longuement retenu l'attention de SCHARDT (cf. III. *A.6*) et ses contemporains. CARON (1966) en a développé l'interprétation tectono-sédimentaire, soulignant sa valeur comme critère de la progression des nappes sur un fond marin. Un autre type important de semelle des nappes préalpines est la *cornieule,* dont le rôle tectonique fut déjà remarqué par SCHARDT (cf. III. *A.7*). Une explication nouvelle de l'origine de cette brèche aux propriétés paradoxales a été proposée récemment (MASSON 1972); elle fait intervenir des fluides sous forte pression et la fracturation hydraulique. Or on sait que l'une des idées récentes les plus originales sur la dynamique des nappes a été de postuler des pressions fluides anormalement fortes le long de leurs

plans de chevauchement; on espère ainsi sortir de l'impasse dans laquelle les relations entre la pente et la friction avaient jusqu'alors enfermé la mécanique des nappes (HUBERT & RUBEY 1959). Mais cette idée, très prometteuse en théorie, a jusqu'ici semblé échapper aux possibilités de vérification et d'application sur le terrain. La cornieule pourrait donc fournir, pour la première fois, une preuve de l'intervention de pressions fluides anormales dans la dynamique de certaines nappes. Enfin, la découverte de calcaires fortement déformés en milieu épimétamorphique à la base d'écailles des Préalpes médianes (BAUD & MASSON 1976) indique un 3e type de semelle, qui semble exceptionnel dans les Préalpes mais rappelle certains faciès tectoniques classiques à la base des nappes helvétiques. Certaines nappes préalpines présentent une juxtaposition de plusieurs types différents de semelles, ce qui tendrait à indiquer qu'un mécanisme de progression fut relayé par un autre.

Le tableau qui se dégage de la considération de tous ces éléments est manifestement complexe, à l'image de la réalité préalpine. Bien qu'une synthèse dynamique apparaisse encore fort éloignée, nous ne doutons point que les Préalpes sauront livrer une nouvelle contribution à une théorie générale de la tectonique des nappes.

Remerciements

J'exprime ma reconnaissance à MM. A. Baud et J. Guex pour leurs conseils et leur aide amicale; P. Bugnon, qui a dessiné plusieurs figures de cet article; et M. Weidmann, qui a mis à ma disposition des documents inédits conservés au Musée géologique de Lausanne.

BIBLIOGRAPHIE

ANDRAU, E. W. K. (1929): *La géologie du Pic Chaussy et ses abords (Alpes vaudoises).* - Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne *44.*

ANTOINE, P. (1972): *Le domaine pennique externe entre Bourg-Saint-Maurice (Savoie) et la frontière italo-suisse.* - Géol. alp. (Grenoble) *48,* 5-40.

ARGAND, E. (1909): *Sur la racine de la nappe rhétique.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *24,* 17-19.

— (1916): *Sur l'arc des Alpes Occidentales.* - Eclogae geol. Helv. *14/*1, 145-191.

— (1924): *La tectonique de l'Asie.* - Congr. géol. int., 13e Sess. (Belgique) *1/*5, 171-372.

BACHMANN, I. (1863): *Über petrefactenreiche exotische Jurablöcke im Flysch des Sihlthals und Toggenburgs.* - Vjschr. natf. Ges. Zürich *8,* 1-34.

BADOUX, H. (1945): *La géologie de la Zone des cols entre la Sarine et le Hahnenmoos.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *84.*

— (1946): *L'Ultra-helvétique au Nord du Rhône valaisan.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *85.*

— (1962): *Géologie des Préalpes valaisannes.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *113.*

— (1963a): *A propos des Préalpes du Chablais* (Livre Paul Fallot II). - Mém. h.s. Soc. géol. France, 379-382.

— (1963b): *Les unités ultrahelvétiques de la Zone des Cols.* - Eclogae geol. Helv. *56/*1, 1-13.

— (1965a): *Feuille Montreux.* Atlas géol. Suisse 1:25000. - Comm. géol. Suisse.

— (1965b): *Feuille Thonon-Châtel.* Carte géol. France 1:50000. - Serv. Carte géol. France.

— (1967): *De quelques phénomènes sédimentaires et gravifiques liés aux orogenèses.* - Eclogae geol. Helv. *60/*2, 399-406.

— (1969): *Réflexions et hypothèses à propos de la limite alpino-dinarique.* - Eclogae geol. Helv. *62/2*, 543-545.

— (1975): *L'Urgonien détritique du village des Diablerets.* - Eclogae geol. Helv *68/2*, 281-284.

BADOUX, H., CHESSEX, R., JEANNET, A., LUGEON, M., & RIVIER, F. (1960): *Feuille Monthey.* Atlas géol. Suisse 1:25000. - Comm. géol. Suisse.

BADOUX, H., & LOMBARD, A. (1962): *Notice explicative de la feuille Lenk.* Atlas géol. Suisse 1:25000. - Comm. géol. Suisse.

BADOUX, H., & MERCANTON, C.-H. (1962): *Essai sur l'évolution tectonique des Préalpes médianes du Chablais.* - Eclogae geol. Helv. *55/1*, 135-188.

BADOUX, H., & WEIDMANN, M. (1963): *Sur l'âge du Flysch à Helminthoïdes des Préalpes romandes et chablaisiennes.* - Eclogae geol. Helv. *56/2*, 513-528.

BAILEY, E. B. (1935): *Tectonic essays, mainly alpine.* - Clarendon, Oxford.

BARBIER, R. (1952): *La prolongation de la zone subbriançonnaise de France en Italie et en Suisse.* - Trav. Lab. Géol. Grenoble *29*, 3-46.

BAUD, A. (1972): *Observations et hypothèses sur la géologie de la partie radicale des Préalpes médianes.* - Eclogae geol. Helv. *65/1*, 43-55.

BAUD, A., & MASSON, H. (1975): *Preuves d'une tectonique liasique de distension dans le domaine briançonnais: failles conjuguées et paléokarst à Saint-Triphon (Préalpes Médianes, Suisse).* - Eclogae geol. Helv. *68/1*, 131-145.

— (1976): *Déformation ductile et bréchification le long du plan de chevauchement de l'écaille de la Gummfluh (Préalpes médianes rigides, Suisse). - Résumé.* - Eclogae geol. Helv. *69/2*, 471-472.

BAUD, A., & MEGARD-GALLI, J. (1975): *Evolution d'un bassin carbonaté du domaine alpin durant la phase pré-océanique: cycles et séquences dans le Trias de la zone briançonnaise des Alpes occidentales et des Préalpes.* - 9e Congr. int. Sédimentol. (Nice) *5*, 45-53.

BEARTH, P. (1976): *Zur Gliederung der Bündnerschiefer in der Region von Zermatt.* - Eclogae geol. Helv. *69/1*, 149-161.

BECHE, H. T. DE LA (1832): *Manual of geology.* - Londres.

BERTRAND, J., & DELALOYE, M. (1976): *Datation par la méthode K-Ar de diverses ophiolites du flysch des Gets (Haute-Savoie, France).* - Eclogae geol. Helv. *69/2*, 335-341.

BERTRAND, M. (1884): *Rapports de structure des Alpes de Glaris et du bassin houiller du Nord.* - Bull. Soc. géol. France (3), *12*, 318-330.

— (1889): *Plis couchés de la région de Draguignan.* - Bull. Soc. géol. France (3), *17*, 234-246.

BETHUNE, P. DE (1955): *Maurice Lugeon, notice nécrologique.* - Bull. Soc. belge Géol. Paléont. Hydrol. *63*, 319-359.

BRUNNER, C. (1857): *Geognostische Beschreibung der Gebirgsmasse des Stockhorns.* - Nouv. Mém. Soc. helv. Sci. nat. *15*, 1-56.

BUFFON, G.-L. L. DE (1778): *Des époques de la nature.* - Imprimerie royale, Paris.

CARON, C. (1965): *L'appartenance tectonique des flyschs du Kalberhöni (Préalpes romandes, Suisse); considérations sur la nappe de la Simme.* - Bull. Soc. géol. France (7), *7*, 921-928.

— (1966): *Sédimentation et tectonique dans les Préalpes: «flysch à lentilles» et autres complexes chaotiques.* - Eclogae geol. Helv. *59/2*, 950-957.

— (1972): *La Nappe Supérieure des Préalpes: subdivisions et principaux caractères du sommet de l'édifice préalpin.* - Eclogae geol. Helv. *65/1*, 57-73.

— (1976): *La nappe du Gurnigel dans les Préalpes.* - Eclogae geol. Helv. *69/2*, 297-308.

CARON, C., & WEIDMANN, M. (1967): *Sur les flysch de la région des Gets (Haute-Savoie).* - Eclogae geol. Helv. *60/2*, 357-398.

CHESSEX, R. (1959): *La géologie de la haute vallée d'Abondance, Haute-Savoie (France).* - Eclogae geol. Helv. *52/1*, 295-400.

COLOMB, A. (1850): *Sur la montagne de la Chérésoletaz de la chaîne des Verraux près de Vevey.* - C.R. Soc. helv. Sci. nat. *35*, 101-109.

COSTA DE BEAUREGARD, O. (1963): *Le second principe de la science du temps.* - Seuil, Paris.

DAL PIAZ, G. (1942): *L'influenza della gravita nei fenomeni orogenetici.* - Atti r. Accad. Sci. Torino *77*, 1-52.

ELIE DE BEAUMONT, L. (1852): *Notice sur les systèmes de montagnes* (I-III). - Bertrand, Paris.

ELLENBERGER, F. (1950): *Sur les affinités briançonnaises du Trias à faciès radical des Préalpes médianes suisses.* - C.R. Soc. géol. France *1950*, 55-57.

— (1952): *Sur l'extension des faciès briançonnais en Suisse, dans les Préalpes médianes et les Pennides.* - Eclogae geol. Helv. *45/2*, 285-286.

— (1958a): *Sur quelques fossiles triasiques du Pennique frontal valaisan.* - C.R. Soc. géol. France *1958*, 168-170.

— (1958b): *Etude géologique du pays de Vanoise.* - Mém. Carte géol. France.

ELTER, G. (1972): *Contribution à la connaissance du Briançonnais interne et de la bordure piémontaise dans les Alpes graies nord-orientales.* - Mem. Ist. Geol. Mineral. Univ. Padova *28*.

ELTER, G., ELTER, P., STURANI, C., & WEIDMANN, M. (1966): *Sur la prolongation ligure de l'Apennin dans le Monferrat et les Alpes et sur l'origine de la nappe de la Simme s.l. des Préalpes romandes et chablaisiennes.* - Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne *167* et Arch. Sci. (Genève) *19/3*, 279-377.

ESCHER, A. (1841): *Geologische Carte des Cantons Glarus.* - Verh. schweiz. natf. Ges. *26*, 54-58.

FALLOT, P. (1954): *Maurice Lugeon (1870-1953).* - Bull. Soc. géol. France (6), *4*, 303-340.

— (1956): *Promenade d'hypothèse en hypothèse.* - Verh. k. nederl. geol. mijnbouwkd. Genoot. (Geol.) *16*, 100-113.

FAVRE, A. (1849): *Notice sur la géologie de la vallée du Reposoir en Savoie et des roches contenant des ammonites et des bélemnites superposées au terrain nummulitique.* - Arch. Sci. phys. nat. (Genève) *11*, 114-120.

— (1859): *Mémoire sur les terrains liasique et keupérien de la Savoie.* - Mém. Soc. Phys. Hist. nat. Genève *15*.

— (1867): *Recherches géologiques dans les parties de la Savoie, du Piémont et de la Suisse voisines du Mont-Blanc* (I-III). - Masson, Paris.

FAVRE, E. (1870): *Le massif du Moléson.* - Arch. Sci. phys. nat. Genève [n.p.] *39*, 169-216.

— (1875): *Description des fossiles du terrain jurassique de la montagne des Voirons.* - Mém. Soc. paléont. suisse *2*.

FAVRE, E., & SCHARDT, H. (1887): *Description géologique des Préalpes du canton de Vaud et du Chablais.* - Matér. Carte géol. Suisse *22*.

FAVRE, J. (1932): *Hans Schardt, 1858-1931.* - C.R. Soc. Phys. Hist. nat. Genève *49*, 11-15.

FISCHER-OOSTER, C. v. (1865): *Beitrag zur paläontologischen Kenntniss der westlichen Schweizer-Alpen.* - Mitt. natf. Ges. Bern *598*, 140-155.

— (1869): *Über die Rhätische Stufe in der Umgegend von Thun.* - Mitt. natf. Ges. Bern *688-696*, 32-99.

FLORES, G. (1955): *Discussion.* In E. BENEO: *Les résultats des études pour la recherche pétrolifère en Sicile.* - Proc. 4th World Petroleum Congr. I, A/2, 121-122.

FLÜCK, W. (1973): *Die Flysche der praealpinen Decken im Simmental und Saanenland.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *146*.

FRÜH, J.J. (1888): *Beiträge zur Kenntniss der Nagelfluh der Schweiz.* - Denkschr. schweiz. natf. Ges. *30*.

GABUS, J.H. (1958): *L'Ultrahelvétique entre Derborence et Bex.* - Matér. Carte géol. Suisse. [n.s.] *106*.

GAGNEBIN, E. (1942): *Les idées actuelles sur la formation des Alpes.* - Actes Soc. helv. Sci. nat. *122*, 47-58.

— (1945): *Quelques problèmes de la tectonique d'écoulement en Suisse orientale.* - Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne *80* et Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *62*, 476-494.

GAGNEBIN, E., & PETERHANS, E. (1927): *Les analogies des Préalpes romandes avec les nappes de l'Ubaye.* - Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne *41* et Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *56*, 265-283.

GEIKIE, A. (1884): *The crystalline rocks of the Scottish Highlands.* - Nature (London) *31*, 29-31.

GIGNOUX, M. (1936): *Géologie stratigraphique.* - Masson, Paris.

— (1942): *Quelques réflexions sur des théories tectoniques récentes.* - Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble *23*, 111-133.

— (1948): *Méditations sur la tectonique d'écoulement par gravité.* - Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble *27*, 1-34.

GILLIÉRON, V. (1873): *Aperçu géologique sur les Alpes de Fribourg.* - Matér. Carte géol. Suisse *12*.

— (1885): *Description géologique des territoires de Vaud, Fribourg et Berne compris dans la feuille XII.* - Matér. Carte géol. Suisse *18*.

GODEL, M. (1965): *Géologie des environs de la Croix de Culet, Val d'Illiez, Valais.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *123*.

GOGUEL, J. (1946): *La tectonique d'écoulement.* - Rev. sci. *84/4*, 207-213.

GOSSELET, J. (1879): *Sur la structure générale du bassin houiller franco-belge.* - Bull. Soc. géol. France (3), *8*, 505-511.

HAUG, E. (1894): *L'origine des Préalpes romandes et les zones de sédimentation des Alpes de Suisse et de Savoie.* - Arch. Sci. phys. nat. Genève (3), *32*, 154-173.
— (1899): *Les régions dites exotiques du versant Nord des Alpes suisses.* - Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *35*, 114-161.
— (1904): *Sur les racines des nappes de charriage dans la chaîne des Alpes.* - C.R. Acad. Sci. (Paris) *138*, 60-62.
— (1925): *Contribution à une synthèse stratigraphique des Alpes occidentales.* - Bull. Soc. géol. France (4), *25*, 97-244.
HEIM, ALB. (1878): *Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung.* - Schwabe, Basel.
— (1908): *Der Bau der Schweizeralpen.* - Njbl. natf. Ges. Zürich *110*.
HEIM, ARN. (1920): *Das helvetische Deckengebirge.* In ALB. HEIM: *Geologie der Schweiz* (II/4). - Tauchnitz, Leipzig.
HÖLDER, H. (1960): *Geologie und Paläontologie in Texten und ihrer Geschichte.* - Alber, Freiburg/München.
HOMEWOOD, P. (1974): *Le flysch du Meilleret (Préalpes romandes) et ses relations avec les unités l'encadrant.* - Eclogae geol. Helv. *67*/2, 349-401.
— (1976): *Sur les faciès des flyschs ultrahelvétiques dans les Préalpes Internes romandes.* - Eclogae geol. Helv. *69*/2, 281-295.
HUBBERT, M.K., & RUBEY, W.W. (1959): *Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting.* - Bull. geol. Soc. Amer. *70*, 115-166.
HUBER, K. (1933): *Geologie der Sattelzone bei Adelboden.* - Diss. Univ. Bern.
JACCARD, F. (1908): *La région Rubli-Gummfluh (Préalpes médianes).* - Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne *11* et Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *43*, 407-548.
JEANNET, A. (1909): *La nappe rhétique dans les Préalpes vaudoises.* - C.R. Acad. Sci. (Paris) *148*, 246-248.
— (1912-1918): *Monographie géologique des Tours d'Aï.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *34*.
KILIAN, W. (1894): *L'origine des Préalpes romandes et de la région de la brèche du Chablais.* - C.R. Soc. géol. France (3), *22*, 22-23.
— (1912): *Sur les couches à Mytilus du Briançonnais.* - C.R. Soc. géol. France (4), *12*, 189-190.
KLAUS, J. (1953): *Les Couches rouges et le Flysch au Sud-Est des Gastlosen.* - Bull. Soc. fribourg. Sci. nat. *42*.
LEMOINE, M. (1961): *La marge externe de la fosse piémontaise dans les Alpes occidentales.* - Rev. Géogr. phys. Géol. dyn. (2), *4*, 163-180.
LEUBA, J. (1932): *Le Professeur Hans Schardt, 1858-1931.* - Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. *56*, 103-119.
LORIOL, P. DE, & SCHARDT, H. (1883): *Etude paléontologique et stratigraphique des couches à Mytilus des Alpes vaudoises.* - Mém. Soc. paléont. suisse *10*.
LUGEON, M. (1896): *La région de la Brèche du Chablais.* - Bull. Serv. Carte géol. France *7*/49, 337-646.
— (1901): *Sur la découverte d'une racine des Préalpes suisses.* - C.R. Acad. Sci. (Paris) *132*, 45-47.
— (1902a): *Les grandes nappes de recouvrement des Alpes du Chablais et de la Suisse.* - Bull. Soc. géol. France (4), *1*, 723-825.
— (1902b): *Les grandes dislocations et la naissance des Alpes suisses.* - Eclogae geol. Helv. *7*, 335-346.
— (1903): *Les nappes de recouvrement de la Tatra et l'origine des Klippes des Carpathes.* - Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne *4* et Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *39*, 17-63.
— (1914): *Sur la présence de lames cristallines dans les Préalpes et leur signification.* - C.R. Acad. Sci. (Paris) *159*, 685-687.
— (1914-1918): *Les Hautes Alpes calcaires entre la Lizerne et la Kander.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *30*.
— (1938): *Quelques faits nouveaux dans les Préalpes internes vaudoises.* - Eclogae geol. Helv. *31*/1, 1-20.
— (1940a): *Sur la formation des Alpes franco-suisses.* - C.R. Soc. géol. France *1940*, 7-10.
— (1940b): *Notice explicative de la feuille Diablerets.* Atlas géol. Suisse 1:25000. - Comm. géol. Suisse.
— (1943): *Une nouvelle hypothèse tectonique: la diverticulation.* - Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *62*, 301-303.
LUGEON, M., & GAGNEBIN, E. (1941): *Observations et vues nouvelles sur la géologie des Préalpes romandes.* - Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne *72* et Mém. Soc. vaud. Sci. nat. *7*/1.
LUGEON, M., & SCHNEEGANS, D. (1940): *Sur le diastrophisme alpin.* - C.R. Acad. Sci. (Paris) *210*, 87-90.
MARGERIE, E. DE, & HEIM, ALB. (1888): *Les dislocations de l'écorce terrestre.* - Wurster, Zürich.
MASSON, H. (1972): *Sur l'origine de la cornieule par fracturation hydraulique.* - Eclogae geol. Helv. *65*/1, 27-41.

— (1976): *Sur le wildflysch et l'Ultrahelvétique liés à la nappe de Morcles. - Résumé.* - Eclogae geol. Helv. *69/2*, 279.

McConnel, R.B., & Raaf, M. de (1929): *Communication préliminaire sur la géologie de la nappe du Niesen entre le Sépey et la Lenk et sur la zone submédiane.* - Eclogae geol. Helv. *22/2*, 95-112.

Mercanton, C.H. (1963): *La bordure ultra-helvétique du massif des Diablerets.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *116.*

Mortillet, G. de (1858): *Géologie et minéralogie de la Savoie.* - Imprimerie nationale, Chambéry.

Mullis, J. (1976): *Die Quarzkristalle des Val d'Illiez - Zeugen spätalpiner Bewegungen.* - Eclogae geol. Helv. *69/2*, 343-357.

Murchison, R.I. (1849): *On the geological structure of the Alps, Apenines and Carpathians.* - Quart. J. geol. Soc. London *5*, 157-312.

Ooster, W.A. (1869): *Le Corallien de Wimmis. Pétrifications remarquables des Alpes suisses.* - Georg, Genève/Bâle.

Orbigny, A. d' (1849-1852): *Cours élémentaire de paléontologie et de géologie stratigraphiques.* - Masson, Paris.

Peach, B.N., & Horne, J. (1884): *Report on the geology of the North-West of Sutherland.* - Nature (London) *31*, 31-35.

Peterhans, E. (1926): *Etude du Lias et des géanticlinaux des Préalpes médianes.* - Mém. Soc. helv. Sci. nat. *62/2.*

Pictet, F.-J., Loriol, P. de, Mortillet, G. de, & Favre, A. (1858): *Description des fossiles contenus dans le Néocomien des Voirons.* - Matér. Paléont. Suisse.

Plancherel, R. (1976): *Essai d'interprétation de la dislocation transversale Bellegarde - Lac Noir (Préalpes médianes fribourgeoises).* - Eclogae geol. Helv. *69/2*, 461-469.

Quenstedt, A. (1838): *Hilsthon in Franken und Schweitz; Muschelkalk der Schweitz.* - N. Jb. Mineral. *1838*, 315.

Rabowski, F. (1909): *Sur l'extension de la nappe rhétique dans les Préalpes bernoises et fribourgeoises.* - C.R. Acad. Sci. (Paris) *148*, 244-246.

— (1920): *Les Préalpes entre le Simmental et le Diemtigtal.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *35.*

Razoumowsky, G. de (1784): *Voyages minéralogiques dans le gouvernement d'Aigle et une partie du Vallais.* - Mourer, Lausanne.

Renevier, E. (1854): *Sur la géologie des Alpes vaudoises.* - Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *3*, 135-139.

— (1856): *Résumé des travaux de Mr. D. Sharpe sur le clivage et la foliation des roches.* - Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *4*, 379-388.

— (1864): *Notices géologiques et paléontologiques sur les Alpes vaudoises.* - Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *8*, 39-97.

— (1873/74): *Tableau des terrains sédimentaires.* - Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *12* et *13.*

— (1877): *Notice sur ma carte géologique de la partie Sud des Alpes vaudoises et régions limitrophes.* - Arch. Sci. phys. nat. (Genève) *59*, 5-49.

— (1890): *Monographie géologique des Hautes-Alpes calcaires.* - Matér. Carte géol. Suisse *16.*

— (1893): *Géologie des Préalpes de la Savoie.* - Eclogae geol. Helv. *4*, 53-73.

Renevier, E., & Lugeon, M. (1893): *Géologie du Chablais et du Faucigny-Nord.* - Eclogae geol. Helv. *3*, 293-298.

Renz, H.H. (1935): *Zur Stratigraphie und Paläontologie der Mytilus-Schichten im östlichen Teil der Préalpes romandes.* - Eclogae geol. Helv. *28/1*, 141-247.

Rosset, J., Charollais, J., Toumarkine, M., Manivit, H., Chateauneuf, J.-J., & Schaub, H. (1976): *Présentation des différentes unités du synclinal de Thônes (Haute-Savoie, France).* - Eclogae geol. Helv. *69/2*, 359-402.

Sarasin, C. (1894): *De l'origine des roches exotiques du flysch.* - Arch. Sci. phys. nat. (3), *31*, 570-603 et *32*, 67-101.

Saussure, H.B. de (1779-1796): *Voyages dans les Alpes.* - Fauche, Neuchâtel.

Schardt, H. (1884): *Etudes géologiques sur le Pays d'Enhaut vaudois.* - Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *20*, 1-183.

— (1885): *Sur l'origine des cargneules.* - Arch. Sci. phys. nat. (3), *14*, 247-251.

— (1892): *Aperçu sur la structure géologique des Préalpes fribourgeoises et vaudoises.* - Arch. Sci. phys. nat. (3), *27*, 91-114.

— (1893): *Sur l'origine des Préalpes romandes.* - Arch. Sci. phys. nat. (3), *30*, 570-583.

— (1898): *Les régions exotiques du versant N des Alpes suisses.* - Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *34*, 114-219.
— (1899): *Les Préalpes romandes.* - Bull. Soc. neuchât. Géogr. *11*, 5-26.
— (1900): *Encore les régions exotiques. Réplique aux attaques de M. Emile Haug.* - Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *36*, 147-169.
— (1907): *Les vues modernes sur la tectonique et l'origine de la chaîne des Alpes.* - Arch. Sci. phys. nat. (4), *23*, 356-385 et 483-496.
SCHEUCHZER, J.J. (1716): *Helvetiae historia naturalis.* - Bodmer, Zürich.
SCHMIDT, C. (1907): *Über die Geologie des Simplongebietes und die Tektonik der Schweizeralpen.* - Eclogae geol. Helv. *9*/4, 484-584.
SCHNEEGANS, D. (1938): *La géologie des nappes de l'Ubaye-Embrunais entre la Durance et l'Ubaye.* - Mém. Carte géol. France.
SEPTFONTAINE, M., & LOMBARD, A. (1976): *Le Jurassique des Préalpes médianes dans le SW du Chablais (Hte-Savoie, France): cadre tectonique et lithostratigraphique.* - Eclogae geol. Helv. *69*/2, 425-460.
STAUB, R. (1958): *Klippendecke und Zentralalpenbau.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *103*.
STEINMANN, G. (1905): *Geologische Beobachtungen in den Alpen II.* - Ber. natf. Ges. Freiburg i.Br. *16*, 18-67.
STREIFF, V. (1962): *Zur östlichen Beheimatung der Klippendecke.* - Eclogae geol. Helv. *55*/1, 77-134.
STUDER, B. (1827): *Remarques géognostiques sur quelques parties de la chaîne septentrionale des Alpes.* - Ann. Sci. nat. Paris *11*, 1-47.
— (1834): *Geologie der westlichen Schweizer-Alpen.* - Groos, Heidelberg/Leipzig.
— (1848): *Sur la véritable signification du nom de Flysch.* - Actes Soc. helv. Sci. nat. *33*, 33-35.
— (1851/53): *Geologie der Schweiz* (I et II). - Bern/Zürich.
STUIJVENBERG, J. VAN, MOREL, R., & JAN DU CHÊNE, R. (1976): *Contribution à l'étude du flysch de la région des Fayaux (Préalpes externes vaudoises).* - Eclogae geol. Helv. *69*/2, 309-326.
SUESS, E. (1875): *Die Entstehung der Alpen.* - Braumüller, Wien.
TERCIER, J. (1945): *Le problème de l'origine des Préalpes.* - Bull. Soc. fribourg. Sci. nat. *37*, 125-140.
— (1948): *Le flysch dans la sédimentation alpine.* - Eclogae geol. Helv. *40*/2, 163-198.
— (1950): *La tectonique d'écoulement dans les Alpes suisses.* - Geol. en Mijnb. *12*, 330-342.
TERMIER, P. (1906): *La synthèse géologique des Alpes.* - Imprimerie moderne, Liège.
TÖRNEBOHM, A.E. (1888): *Om Fjällproblemet.* - Geol. Fören. Stockholm Förh. *10*, 328.
TRÜMPY, R. (1955): *Remarques sur la corrélation des unités penniques externes entre la Savoie et le Valais et sur l'origine des nappes préalpines.* - Bull. Soc. géol. France (6), *5*, 217-231.
— (1960): *Paleotectonic evolution of the central and western Alps.* - Bull. geol. Soc. Amer. *71*, 843-908.
— (1969): *Die helvetischen Decken der Ostschweiz: Versuch einer palinspastischen Korrelation und Ansätze zu einer kinematischen Analyse.* - Eclogae geol. Helv. *62*/1, 105-142.
— (1976): *Du Pèlerin aux Pyrénées.* - Eclogae geol. Helv. *69*/2, 249-264.
TRÜMPY, R., & BERSIER, A. (1954): *Les éléments des conglomérats oligocènes du Mont-Pélerin.* - Eclogae geol. Helv. *47*/1, 119-166.
VUAGNAT, M. (1952): *Pétrographie, répartition et origine des microbrèches du Flysch nordhelvétique.* - Matér. Carte géol. Suisse [n.s.] *97*.
WEGENER, A. (1915): *Die Entstehung der Kontinente und Ozeane.* - Vieweg, Braunschweig.
WEIDMANN, M. (1967): *Petite contribution à la connaissance du flysch.* - Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne *166* et Bull. Soc. vaud. Sci. nat. *69*, 395-400.
WEIDMANN, M., HOMEWOOD, P., CARON, C., & BAUD, A. (1976): *Réhabilitation de la «Zone Submédiane» des Préalpes.* - Eclogae geol. Helv. *69*/2, 265-277.