



HAL
open science

Évolution du rapport entre observation et interprétation dans l'histoire des coupes géologiques alpines

Claudio Rosenberg

► **To cite this version:**

Claudio Rosenberg. Évolution du rapport entre observation et interprétation dans l'histoire des coupes géologiques alpines. Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie, 2022, 3ème série (tome 36), pp.43-58. hal-04646118

HAL Id: hal-04646118

<https://hal.science/hal-04646118>

Submitted on 12 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Évolution du rapport entre observation et interprétation dans l'histoire des coupes géologiques alpines

Claudio ROSENBERG

ISTeP, Sorbonne Université
4, Place Jussieu. 75005 Paris, France

Résumé. L'histoire des coupes géologiques des Alpes montre l'évolution progressive d'illustrations figurant les structures et unités géologiques de flancs raides de vallées alpines **vers** des coupes représentant des plans verticaux, dans lesquels l'observation pure devient de plus en plus assortie d'interprétations conceptuelles. C'est au cours de la 2^{ème} moitié du XIX^e siècle que l'interprétation des coupes est elle-même intégrée dans la représentation, afin de montrer la continuité latérale des affleurements, cachée à l'observation par le Quaternaire, mais aussi la continuité verticale, interprétée au-dessus et en dessous de la surface topographique. C'est ainsi que les coupes géologiques deviennent des représentations de structures géologiques, faisant abstraction de la topographie locale et intégrant, sans les distinguer explicitement, observation et interprétation. À partir de la première moitié du XX^e siècle, les coupes deviennent aussi l'outil de représentation de l'évolution tectonique de la chaîne alpine au cours du temps. Ces coupes sont par définition des représentations d'une interprétation, mais elles montrent une évolution intéressante d'une interprétation qui a comme point de départ l'observation de l'état actuel (ARGAND, 1916) à une interprétation qui a comme point de départ un concept, notamment celui de la tectonique des plaques (LAUBSCHER, 1970). La puissance explicative de cette théorie initie une longue phase à partir des années 1970', au cours de laquelle les coupes alpines deviennent la représentation de concepts généraux de cette dernière théorie, plus que d'observations géologiques. L'intégration des nouvelles données géophysiques, entre les années 1970 et 1990 sur la structure alpine profonde refocalise l'intérêt scientifique et les coupes sur l'observation de la structure actuelle. Une nouvelle phase dans la réalisation des coupes alpines commence au début du XXI^e siècle avec la représentation des résultats de la tomographie sismique. Ces données sont surtout utilisées pour montrer des anomalies de vitesse sismique, dont la distribution dans l'espace est sensée indiquer la structure des panneaux plongeants (slabs) jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de profondeur. L'interprétation géodynamique de ces anomalies correspond toutefois à l'application d'une théorie validée *a priori*, celle de la tectonique des plaques, à une géométrie qui doit elle-même être interprétée en termes de paramètres physiques non univoques, tels que la variation de nature minéralogique du manteau et/ou la variation de sa température. L'interprétation des coupes tomographiques alpines se fait en appliquant un modèle géodynamique préexistant (tectonique des plaques), à un modèle géophysique actuel (anomalies de vitesse sismique).

Mots-clés : coupes géologiques alpines – histoire de la tectonique – Alpes

Abstract. The history of alpine cross sections shows the progressive evolution from illustrations of structures and stratigraphic units exposed on steep valley flanks to sections representing vertical planes, in which the representation of the purely observed becomes more and more completed by conceptual interpretations. In the 2nd half of the 19th century interpretations of cross sections are themselves integrated into the cross sections in order to show the lateral continuity of outcrops that is hidden to the observer by quaternary deposits, but also to show vertical continuity, interpreted above and below the topographic surface. That is how cross sections become representations of geological structures disregarding local topography and integrating, without distinguishing them explicitly observation and interpretation. Since the 1st half of the 20th geological cross sections also become the tool used to represent tectonic evolution of the Alpine Chain through time. These sections are by definition representations of interpretations, but they show an interesting evolution from an interpretation based on observation of the present state (ARGAND, 1916) to an interpretation based on a concept, namely that of Plate Tectonics (LAUBSCHER, 1970). The explanatory power of the theory of Plate Tectonics initiates a long phase, starting in the 1970', during which alpine sections become the representation of general concepts of the latter theory, rather than of geological observations. The integration of new geophysical data, between the 1970 and

1990', the deep structure of the Alps, helps to bring back the attention on the observation of the present structure. A new phase in the completion of alpine cross sections is initiated at the beginning of the 21st century, in order to represent the results of seismic tomographic studies. These data are mainly used to illustrate anomalies of seismic velocities, whose spatial distribution is supposed to indicate the structure of the Alpine slabs down to several 100's of km. The geodynamic interpretation of these anomalies corresponds, however, to the application of an apriori validated theory, namely that of Plate Tectonics, to a spatial pattern, which needs itself to be interpreted in terms of physical parameters that can rarely be unequivocally assessed, such as variation in mantle mineralogy, and/or temperature variations. Interpreting tomographic sections from the Alps is made by applying an already existent geodynamic model (Plate Tectonics) to a present geophysical model (anomalies of seismic velocity).

Keywords : alpine géological sections – History of tectonics – Alps

1. Introduction

Les coupes géologiques au sens moderne du terme, c'est-à-dire des représentations d'unités et structures géologiques sur un plan vertical, extrapolées et interprétées en profondeur, existent depuis le début de la seconde moitié du XIX^e siècle (par ex. les coupes de MURCHISON, 1850). Pour que des interprétations des parties de ces structures enlevées par l'érosion au-dessus de la surface topographique soient aussi figurées, il faut attendre encore une dizaine d'année (LORY, 1860 ; GIORDANO, 1869 ; HEIM, 1878). Durant tout le XVIII^e siècle et la première moitié du XIX^e, les coupes géologiques représentent des couches et des structures visibles sur les flancs escarpés de vallées alpines et dessinées sur le terrain par les géologues. Le passage des dessins panoramiques de paysages alpins montrant de grands affleurements de couches sédimentaires (par ex. MARSIGLI, 1705, publié par GORTANI, 1930) aux coupes géologiques au sens moderne du terme se fait de manière graduelle au cours du XIX^e siècle (ROSENBERG, 2023). Ce changement marque le début d'un changement dans le rapport entre observation et interprétation dans la représentation des coupes géologiques, qui va évoluer jusqu'à nos jours. Ce texte n'a pas l'ambition de retracer de manière exhaustive toute l'histoire des coupes alpines, mais plutôt de souligner, par la sélection de quelques études et coupes emblématiques, quand et pourquoi se sont réalisés des changements fondamentaux, ayant modifié le rapport entre observation et interprétation au cours de l'histoire des coupes géologiques. Une histoire plus complète de l'évolution des coupes alpine est présentée dans ROSENBERG, 2023.

2. Les étapes principales de l'évolution historique des coupes géologiques

2.1. Le XVIII^e siècle

Les toutes premières coupes géologiques de l'histoire ont été réalisées au début du XVIII^e siècle (ROSENBERG, 2023). Il s'agit de représentations d'observations de terrain, de flancs de vallées très raides (MARSIGLI, 1705 ; SCHEUCHZER, 1708 ; Fig. 1), montrant ainsi des coupes « naturelles ». Ces illustrations précèdent celles des coupes sur des plans verticaux, construites à partir de cartes géologiques, telles que celles qui se réalisent à partir de la seconde moitié du XIX^e siècle.

Les coupes de la première moitié du XVIII^e siècle reproduisent un paysage alpin dans lequel on reconnaît des couches sédimentaires et les structures qu'elles dessinent, mais aussi tous les autres détails qui forment le paysage et ne fournissent pas directement d'information géologique. Autrement dit, ces coupes naturelles montrent le paysage tel qu'il est perçu par le naturaliste sans la moindre abstraction qui mettrait en évidence une interprétation géologique. Le travail conceptuel du scientifique est limité au choix du paysage et de la structure à représenter.

Un changement significatif s'opère au début de la seconde moitié du XVIII^e siècle, avec la coupe de Giovanni Arduino (1752; Fig. 2), qui dessine un flanc de la vallée d'Agno (Alpes italiennes, au NE de Vérone) en utilisant des figurés pour représenter les différentes couches sédimentaires et des lettres qui renvoient à une légende. C'est ainsi que pour la première fois dans l'histoire des coupes alpines, l'interprétation géologique de la coupe vient compléter l'observation.

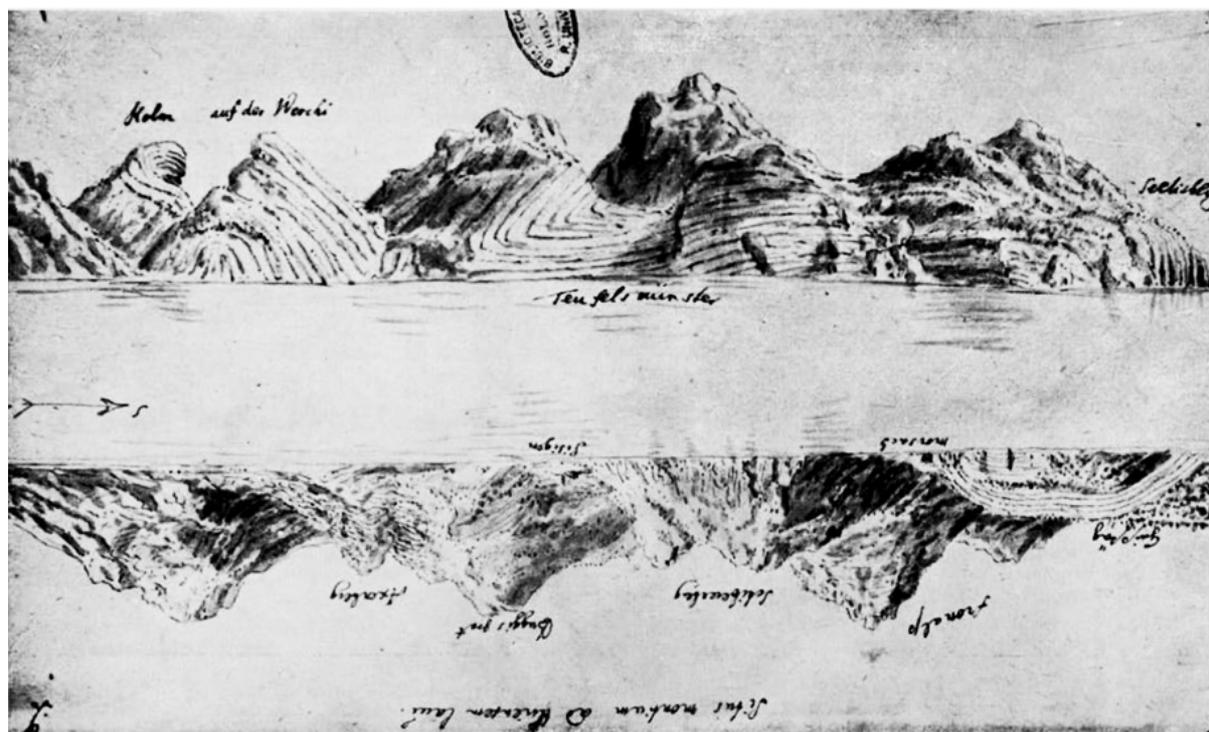


Fig. 1. Marsigli (1705). Représentation d'affleurements de couches mésozoïques plissées sur les bords du Lac d'Uri (Alpes Suisses nord-orientales). Aucune légende accompagne cette représentation. Reproduit de Gortani (1930).



Fig. 2. Giovanni Arduino (1752). Coupe de la Vallée de l'Agno. Les couches se distinguent grâce aux figurés et aux lettres qui renvoient à une description de la légende.

2.2. Le XIX^e siècle

2.2.1. Bernhard Studer (1794-1887)

Bernhard Studer, souvent appelé le « Grand Maître » par ses collègues et disciples (SCHARDTt, 1904 ; SENGÖR, 2003), est le premier à réaliser une étude systématique de la géologie des Alpes suisses, publiée dans les deux volumes de son œuvre *Geologie der Schweiz*

(1851, 1853). Déjà, en 1834, il réalise une première synthèse de la géologie des Alpes suisses occidentales (STUDER, 1834), qu'il accompagne d'un atlas et de 5 planches de figures. Les trois planches premières montrent six coupes (Fig. 3a) colorées dans lesquelles sont distinguées 12 unités géologiques. La partie colorée de la coupe, c'est-à-dire la partie indiquant la nature lithologique des terrains, ne forme qu'une bande d'épaisseur faible et variable

sous le tracé de la surface. La base de cette bande se trouve à des altitudes variables, qui suivent les changements d'altitude de la surface topographique (Fig. 3a). En conséquence, les parties de la coupe situées sous les zones topographiquement plus élevées sont constituées par de grandes surfaces laissées en blanc, c'est-à-dire sans aucune information (Fig. 3a). Cette façon de dessiner les coupes souligne le fait qu'elles sont réalisées à partir de l'observation directe du terrain ne permettant d'observer les parties plus profondes que dans le fond des

vallées. Les unités lithologiques sont dessinées sur une coupe topographique qui essaye de rendre, autant que possible, l'effet 3D du paysage, soulignant les irrégularités des pentes topographiques et les distances relatives des montagnes par rapport à l'observateur. Des lignes fines, parallèles et régulières dessinées en plusieurs endroits semblent souligner la présence et l'orientation des strates, mais elles sont parfois difficiles à distinguer par rapport à d'autres lignes, qui représentent des fractures et des accidents topographiques.

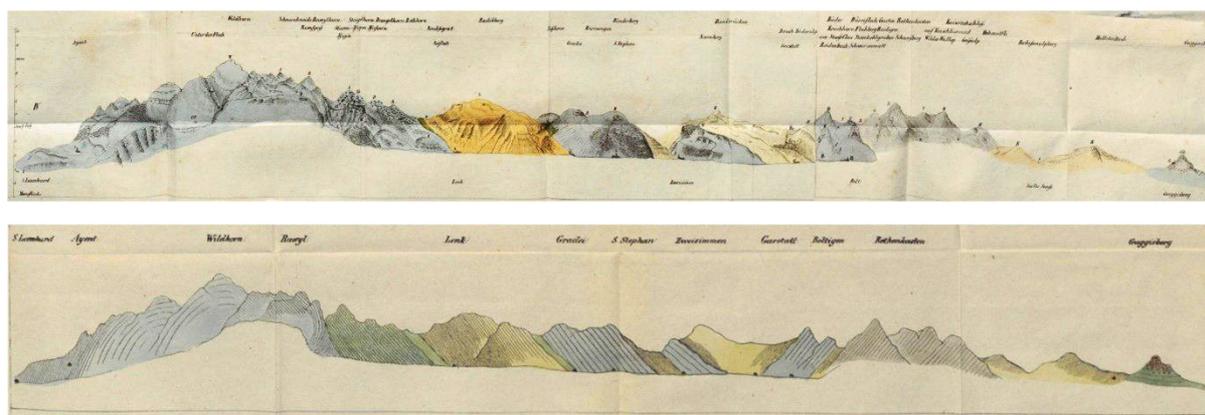


Fig. 3. Coupes géologiques de Bernhard Studer (1834). Les coupes sont orientées N (droite) – S (gauche) et le tracé commence à St Leonard, au N de Sion et se termine au Guggisberg, au sud de Berne. (a) Une des 6 coupes géologiques dénommées *Profil* par Studer. Cette coupe montre les contacts entre différentes unités stratigraphiques, décrites dans la légende. Ces contacts sont représentés le long d'une bande sous-jacente la ligne de la surface topographique. Cette bande correspond à la zone d'affleurements observable. La complexité de la surface topographique est habilement dessinée afin de rendre un effet 3D; (b) Une des trois coupes géologiques (légèrement) interprétées, appelée *Ideales Profil* par Studer (1834). Il s'agit du même tracé de coupe que sur la Fig.3a. La bande colorée, illustrant les contacts et géométries des couches, est extrapolée vers le bas et la complexité de la surface topographique est fortement réduite par rapport à la Fig. 3a, mais non pas éliminée.

La dernière des planches repropose trois des six coupes précédentes, mais dans une version légèrement modifiée. Les nombreuses lignes destinées à illustrer la complexité de la pente topographique ont disparu quasiment intégralement (Fig. 3b). À l'intérieur de chaque unité lithologique, des lignes régulières montrent le pendage de la stratification et son plissement lorsqu'il est présent. De plus, l'épaisseur de la bande colorée est plus grande par rapport aux coupes de la Fig. 3a. La simplification de la surface topographique, l'ajout d'une information structurale et l'augmentation de la surface représentant les unités géologiques, font ressortir avec une certaine clarté la structure et l'orientation des contacts géologiques dans ces coupes.

Toutefois, ces dernières sont encore loin de représenter un plan vertical interprété dans sa globalité, tel qu'on a commencé à le faire dans la seconde moitié du XIX^e siècle. En effet, les effets 3D sont fortement réduits mais pas complètement éliminés. Par exemple, en dessous de la Dent de Morcles (Fig. 3b), on distingue clairement trois grands plans topographiques, le plus bas étant plus en avant par rapport aux autres. De plus, les lignes illustrant le pendage des couches ne sont pas dessinées partout et peuvent être absentes à des endroits très critiques, telle la partie basse de la Pointe de Chamoussard (Fig. 3b), où l'on devine la charnière d'un grand synclinal. Enfin, la bande colorée montrant les unités lithologiques est plus épaisse par rapport à la Fig. 3a, mais sa

base suit toujours les irrégularités de la surface topographique dessinée sur la coupe.

En conclusion, Studer (1834) dessine d'abord les coupes telles qu'il les voit sur le terrain, en essayant de reproduire fidèlement le point de vue de l'observateur, à la fois par rapport à la complexité topographique et par rapport à la distinction d'unités lithologiques. Dans une deuxième étape, clairement séparée de cette dernière, il reprend les mêmes coupes et y interprète la structure géologique, mais seulement légèrement, dans un domaine très limité dans l'espace. Il le fait en extrapolant la représentation des unités géologiques vers le bas, en éliminant la très grande partie des accidents topographiques, c'est-à-dire en se rapprochant, mais sans y arriver entièrement, d'une représentation sur un plan vertical. Ceci lui permet de tracer des contacts rectilignes entre les différentes unités, et de représenter le pendage de la stratification, même si c'est de manière incomplète. Son interprétation (Fig. 3b) ne modifie que légèrement son observation (Fig. 3a), mais Studer tient à souligner clairement cette différence. Il utilise une nouvelle planche alors que son livre de 420 pages n'en contient que 5 (STUDER, 1834) et il se sert de termes différents pour souligner la nature différente des deux types de coupes. Il dénomme la coupe observée « Coupe géologique » (*Geologisches Profil*) et il appelle la coupe légèrement interprétée « Coupe idéalisée » (*Ideales Profil*). Studer (1834) souligne l'importance de la fidélité de la reproduction de l'observation naturelle, non interprétée : « *In den ... Profilen sind die Umrisse, so gut es mir möglich war, der Natur getreu gezeichnet worden* ».

2.2.3. Albert Heim (1849-1937) et Hans Schardt (1858-1931)

Au cours de la deuxième moitié du XIX^e siècle, la partie interprétative des coupes gagne en importance, ce qui se traduit par des coupes montrant un plan vertical complètement interprété jusqu'à une ligne horizontale en profondeur (MURCHISON, 1950) et des lignes interprétatives (surfaces tectoniques et/ou stratigraphiques) au-dessus de la surface topographique (LORY, 1860 ; FAVRE, 1867 ; GIORDANO, 1869 ; HEIM, 1878 ; BERTRAND, 1884). Ce dernier pas

représente le résultat de l'avancée des connaissances tectoniques, accompagnées de grands débats qui ont besoin de s'appuyer sur la visualisation claire fournie par des coupes, surtout au-dessus de la surface topographiques (LORY, 1860 ; FAVRE, 1867), qui est souvent la source du débat, puisque ces parties ne sont pas directement visibles dans le paysage. C'est le cas pour l'établissement du type de charnière de certains plis (LORY, 1860), ou bien l'existence de grands plis (HEIM, 1878) ou de chevauchements (BERTRAND, 1884), et finalement l'identification de grands plans de chevauchements formant la base érodée de nappes (GIORDANO, 1869 ; SCHARDT, 1893 ; 1898). C'est ainsi que paraissent dans la littérature des coupes différentes de la même région, différentes dans leur partie interprétative, celle-ci étant illustrée à la fois au-dessus et en dessous de la surface topographique.

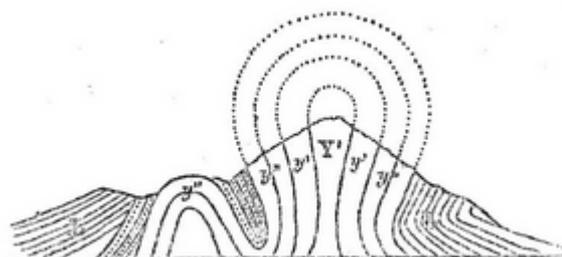


Fig. 4. LORY (1860). Plis d'Allevard, « coupe théorique ». Une fine ligne pointillée marque la charnière anticlinale au-dessus de la surface topographique, interprétant ainsi la distribution symétrique des couches, observée à l'affleurement.

Le tout premier exemple de coupe réalisée en représentant à la fois les ensembles géologiques en dessous et au-dessus de la ligne de la surface topographique est celui de Lory (1860). Ce dernier, dessine pour la toute première fois des lignes au-dessus de la surface topographique afin d'illustrer la géométrie supposée des couches là où elles n'existent plus, là où elles ont été enlevées par l'érosion. En franchissant la limite de la surface topographique, la coupe s'éloigne de l'observation naturelle pour inclure une interprétation de la géométrie naturelle, tout en étant conscient qu'on ne pourra jamais l'observer. Lory (1860) emprunte cette voie pour mettre en lumière le processus qui, d'après lui, est à l'origine de la disposition symétrique de couches en l'absence de charnière visible à l'affleurement

¹ « Dans les coupes j'ai essayé, autant qu'il m'en a été possible, de tracer fidèlement les contacts naturels fidèlement »

(Fig. 4). À l'exemple de Studer (1834), il qualifie sa coupe de « *théorique* » (LORY, 1860).

Albert Heim (1878) est le premier à proposer une interprétation d'ensemble cohérente de coupes complexes au moyen du tracé des couches au-dessus de la surface topographique (Fig. 5). Il le fait sur des coupes sériées de la région de Glaris, dans lesquelles il trace des plis couchés déterminant une inversion stratigraphique. Dans la partie sud de sa coupe, Heim (1878) dessine des plis avec une vergence nord tandis que, plus au nord, il en représente d'autres avec une vergence sud (Fig. 5), ce qui a conduit à parler du « double pli de Glaris ». Son

interprétation se révélera être fautive (BERTRAND, 1884), mais elle a le grand mérite de la clarté. Les coupes de Heim (1878) sont détaillées, précises, merveilleusement dessinées et proposent une solution géométriquement possible pour établir la continuité de chaque unité stratigraphique d'un bout à l'autre de chaque coupe. Cette continuité géométrique du Crétacé inférieur, répété de façon discontinue à l'affleurement, représente une explication d'observations jusque-là totalement inexpliquées. Par comparaison, les coupes de Studer (1834 ; Fig. 3ab) documentent l'observable, mais ne l'expliquent pas.

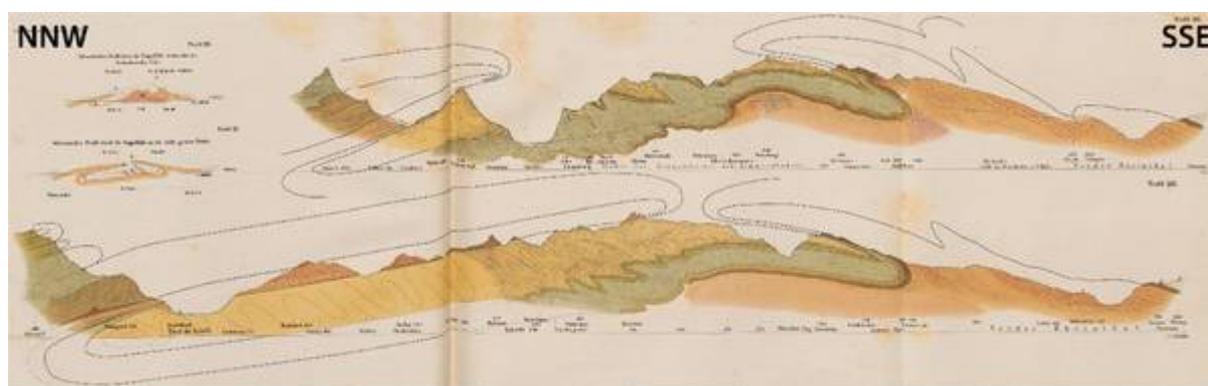


Fig. 5. HEIM, 1878. Coupes de la région de Glaris (Alpes suisses). L'inversion de la série stratigraphique est interprétée comme le résultat de plis couchés de vergence opposée : le « double pli de Glaris ». Heim dessine les charnières des plis au-dessus et en dessous de la surface topographique. La ligne pointillée de Heim est retracée ici pour la mettre plus en évidence.

Un autre excellent exemple témoignant de la nouvelle importance qu'on attribue à l'interprétation se retrouve dans les nombreuses études de la géologie et tectonique du Simplon (Alpes occidentales suisses/italiennes). Le tout premier projet de tunnel ferroviaire a été lancé en 1853, mais la réalisation du tunnel ne commence qu'en 1895. L'intérêt porté à la géologie de cette région sur une période si longue a permis de voir la publication d'un grand nombre de coupes géologiques interprétatives au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle. Schardt (1904) publie une synthèse de toutes ces interprétations différentes, y compris les siennes (Fig. 6). Il devient alors clair que la vraie compréhension des coupes dépend de la manière dont on interprète la partie érodée au-dessus de la surface topographique (mais aussi celle au-dessous). Ce sont ces parties, invisibles dans le paysage, qui

permettent de comprendre comment et pourquoi les couches que l'on observe à la surface se répètent et changent de pendage à travers l'espace.

À plusieurs reprises, on trouve dans les publications de Schardt des commentaires au sujet de l'interprétation conceptuelle, révélateurs de son état d'esprit très moderne et de la nouvelle approche qui va s'imposer globalement au cours de la première décennie du XX^e siècle. En 1898, Schardt écrit à propos de Gilliéron et de ses travaux dans les Préalpes : « *il n'a cherché à constater avec le plus grand soin que ce qui est réellement visible* ». En 1904, il écrit à propos des travaux de Gerlach (qu'il admire sincèrement) : « *...le val Devero, est indiqué comme un exemple frappant de chevauchement (Ueberschiebung) d'environ 10 kilomètres.* » Cette constatation

témoigne de la clairvoyance de ce savant. On ne peut dire cependant que Gerlach « précéda son temps ». Gerlach a vu « ce qui était visible ». Et enfin, en 1904, Schardt écrit à propos du travail de Lugeon : « M. Lugeon a appliqué aussi aux

gneiss du Simplon le principe des plis couchés ... ». Dans cette vision moderne, il s'agit donc de dépasser ce qui est « simplement » visible, de compléter ce visible en y appliquant des concepts de nature

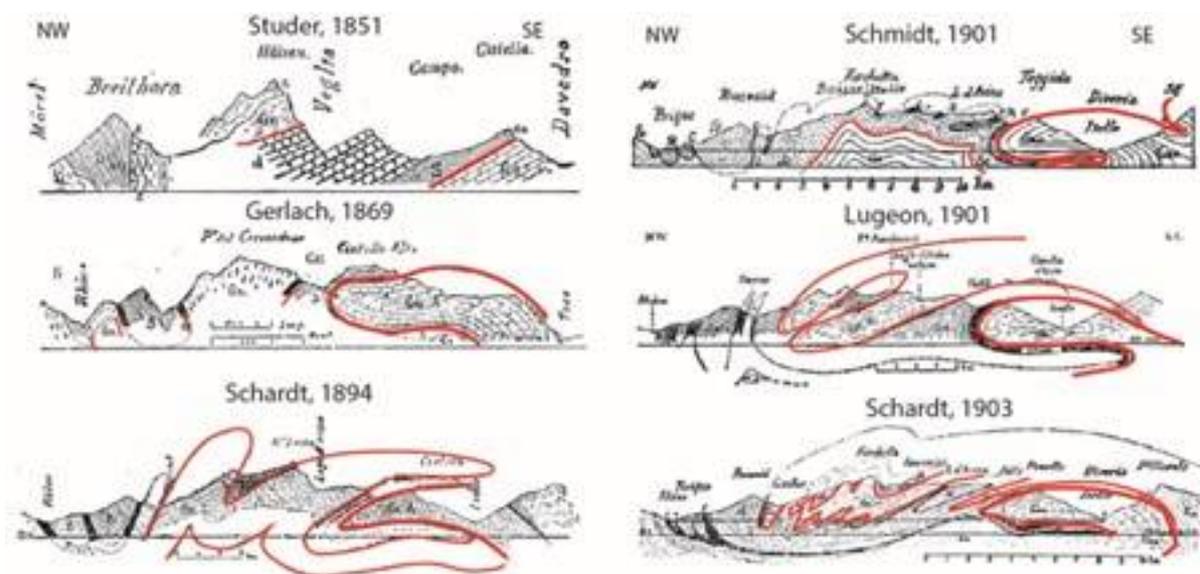


Fig. 6. Sélection des coupes considérées les plus significatives parmi celles montrées et discutées par SCHARDT (1904) dans sa synthèse historique de la géologie du massif du Simplon. Les lignes rouges rajoutées aux coupes originales permettent de visualiser les mêmes marqueurs mais leur différente géométrie en fonction des différents auteurs. Elles délimitent les unités de socle.

2.3. Le XX^e siècle

2.3.1. Émile Argand (1879-1940)

Émile Argand commence ses études alpines sous la direction de Maurice Lugeon, à l'époque où ce dernier est déjà convaincu de l'existence des nappes et est déterminé à établir la structure d'ensemble de l'édifice de nappes alpin. Émile Argand concentre ses études sur la structure des Alpes occidentales et synthétise ses connaissances dans des coupes à l'échelle de l'orogène (1909 ; Fig. 7) qui marquent profondément l'histoire de la géologie alpine pour plusieurs raisons :

(1) Argand formalise et utilise une technique de projection latérale le long des axes de plis pour construire ces coupes. Cette technique de projection latérale était déjà utilisée auparavant (LUGEON, 1902; TERMIER, 1903),

mais pas de manière aussi rigoureuse et systématique ;

- (2) grâce à cette technique de projection latérale et à des cartes géologiques plus détaillées, Argand (1916) construit une coupe des Alpes occidentales à l'échelle de l'orogène illustrant l'anatomie de la chaîne entre environ 6 000 m d'altitude et 20 km de profondeur ;
- (3) sa coupe (Fig. 7) montre de manière détaillée l'empilement et la géométrie des nappes et, à part quelques détails, sa reconstruction géométrique a été confirmée jusqu'à présent ;
- (4) Argand (1916) utilise sa construction en coupe pour réaliser la première rétro-déformation d'un prisme orogénique (Fig. 8). géométrique, dans ce dernier cas celui des plis couchés

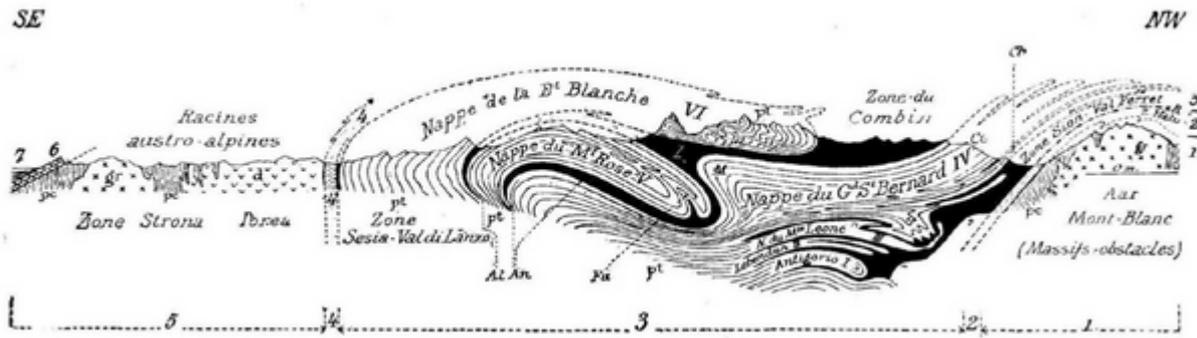


Fig. 7. ARGAND (1909). Coupe des Alpes occidentales. Grâce à la projection latérale des structures de surface, réalisée parallèlement aux axes des grands plis, Argand construit une coupe de plus de 20 km de profondeur, sans aucune contrainte géophysique.

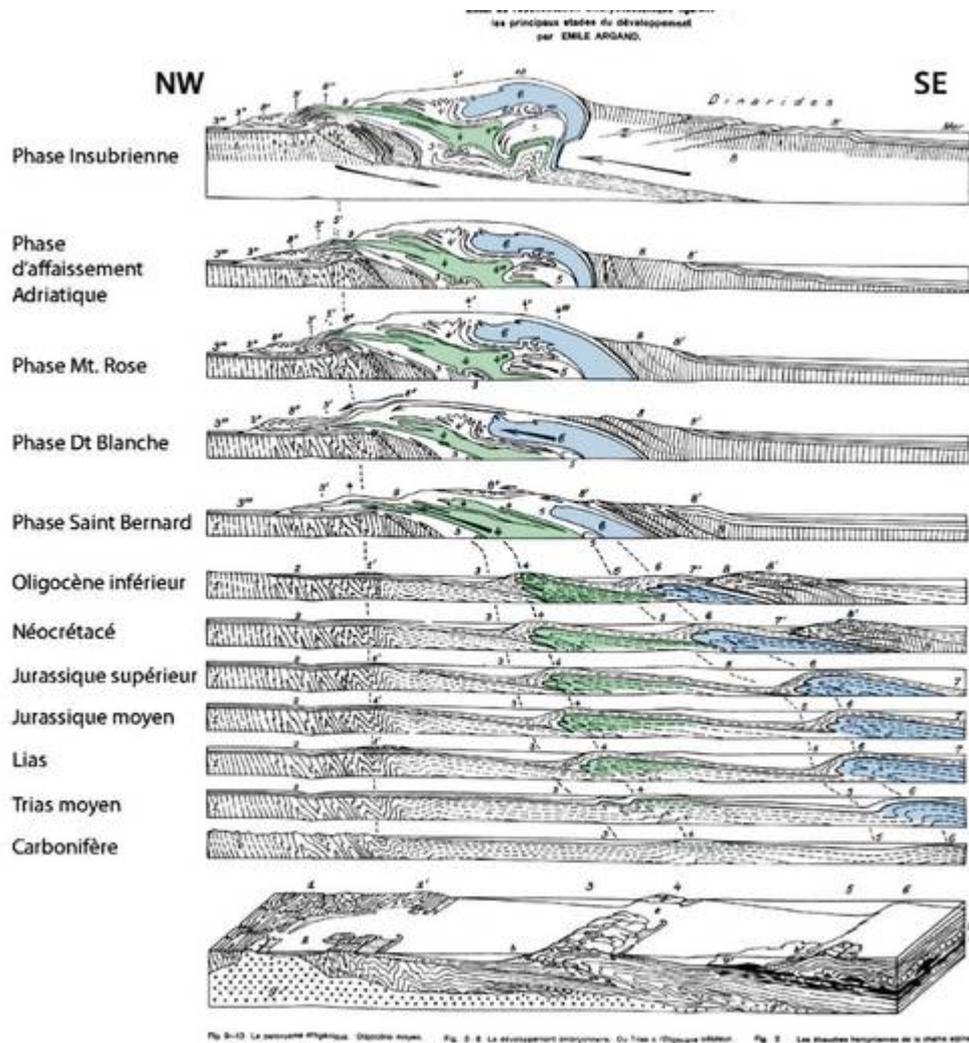


Fig. 8. ARGAND (1916). Rétro-déformation de la coupe des Alpes occidentales. Les surfaces vertes et bleues sont rajoutées, afin de suivre plus facilement l'évolution géométrique de certaines nappes (bleu : nappe du Mt Rose ; vert : nappe de Sivez-Mischabel). Argand utilise comme point de départ pour sa rétro-déformation la coupe actuelle. Etape par étape il la rétro-déforme en éliminant les plis post-nappes d'abord et les chevauchements d'une nappe sur l'autre après. Son critère de dépliement est d'arriver à l'horizontalité des nappes, mais ce critère n'est pas appliqué au-delà du Trias. A ce stade Argand appuie sa reconstruction à un modèle conceptuel, celui des géoanticlinaux, gardant ainsi des plis de socle qui génèrent des hauts structuraux et topographiques.

La coupe d'Argand (1909 ; 1916) est donc entièrement construite grâce à ses cartes géologiques et ses projections latérales. C'est-à-dire que non seulement elle n'est pas réalisée par des observations directes de structures dans le paysage, mais elle est le résultat de structures non directement observables, car il s'agit d'éléments réunis dans un même plan vertical de coupe, mais qui dans la réalité naturelle proviennent de régions très éloignées, et ne font pas naturellement partie d'un même plan. La coupe d'Argand (1916) ne montre plus la ligne de la surface topographique. Celle-ci n'est plus grande importance car la coupe ne représente pas une trace linéaire particulière à la surface, mais plutôt un nombre infini de traces parallèles, toutes comprises dans l'espace des projections latérales réalisées. Cet espace a une extension en carte de plus de 100 km perpendiculairement à la coupe.

En conclusion, la coupe argandienne est de nature très différente de celles de Studer. Ces dernières sont une représentation directe de la nature, la première est une construction qui est basée sur de nombreuses observations directes (cartographiées) de la nature. Ce n'est que dans le cas fortement irréaliste d'un cylindrisme parfait, que la coupe argandienne peut être considérée comme une reproduction fidèle d'un plan vertical existant à un ou plusieurs endroits dans la nature. Il est plus réaliste de conclure que la coupe argandienne n'existe à aucun endroit dans la nature, mais qu'elle est notre seule et meilleure (plus représentative) illustration d'une coupe alpine à l'échelle de l'orogène qui, par sa dimension verticale, ne pourrait jamais être observée.

Les coupes d'Émile Argand influencent grandement les études d'autres parties de la chaîne alpine, qui vont être aussi synthétisées par des coupes à l'échelle de l'orogène (STAUB 1924) dans le style d'Argand (1909 ; 1916), c'est-à-dire en précisant la géométrie des nappes et leur empiement. Les coupes des Alpes des années 1920 et du début des années 1930 sont très détaillées et quasiment identiques à celles

des années 1980 (LUGEON 1934 ; BÜCHI et TRÜMPY, 1976).

2.3.2. Les premières décennies de la tectonique des plaques

La tectonique des plaques a été adoptée tardivement par la communauté des géologues alpins (TRÜMPY, 2001) et le premier à l'avoir intégrée dans des modèles d'orogénèse alpine fut Hans Laubscher. Ce dernier écrivit un article de portée générale sur les processus de formation des chaînes de montagnes (LAUBSCHER, 1969), dans l'introduction duquel il expose sa vision du rapport entre observation et collecte de données géologiques d'une part, et les interprétations conceptuelles correspondantes d'autre part. Il écrit : « *"Homo sapiens" has been and still is much of a myth-maker; he cannot collect isolated data without employing his imagination. He must see facts as part of a pattern, of a story, of a myth... This applies particularly to the concepts of mountain building. The favorite current myth in global tectonics is "ocean floor spreading" »². Avec cette introduction, Laubscher inverse complètement le point de vue de Studer (1834). Il ne s'agit plus ni de reproduire fidèlement la nature, ni de rajouter une interprétation à l'observation de la nature (LORY, 1860 ; HEIM, 1878 ; BERTRAND, 1884 ; SCHARDT, 1894), mais de considérer que toute observation est guidée par un modèle : celui de la tectonique des plaques à l'époque de Laubscher. Autrement dit, l'observation et la reproduction fidèle de la nature ne sont pas vraiment possibles puisqu'elles sont entièrement dirigées par un modèle conceptuel, lequel, contrairement à la nature, varie au cours du temps.*

Laubscher (1970) publie une reconstitution en coupes de l'ensemble de l'orogénèse alpine (Fig. 9), basée sur les concepts de la tectonique des plaques. L'évolution est décrite en détail et illustrée en 12 étapes et autant de coupes à l'échelle lithosphérique, allant de l'extension jurassique à la subduction, puis à la collision, jusqu'à la structure actuelle. Il s'agit non seulement de la première représentation des Alpes basée sur la tectonique des plaques, mais

² *"Homo sapiens" a été et demeure toujours un créateur de mythes ; il est incapable de collectionner des données isolées sans employer son imagination. Il doit voir les faits comme faisant partie d'un dessin, d'une histoire, d'un mythe... Ceci s'applique particulièrement aux concepts de formation de chaînes de montagnes. Le mythe actuellement privilégié en tectonique globale est celui de l'accrétion océanique.*

aussi des premières coupes Alpines à l'échelle lithosphérique. Des aspects très modernes, tels que la déchirure du panneau plongeant, y sont discutés et illustrés. En revanche les structures crustales, si rigoureusement décrites au cours des premières décennies du XX^e siècle, sont

absentes de cette reconstitution. Même la coupe actuelle désormais bien connue, censée représenter la structure des nappes, ne montre que des traits schématiques qui ne permettent pas de reconnaître la structure de la croûte alpine.

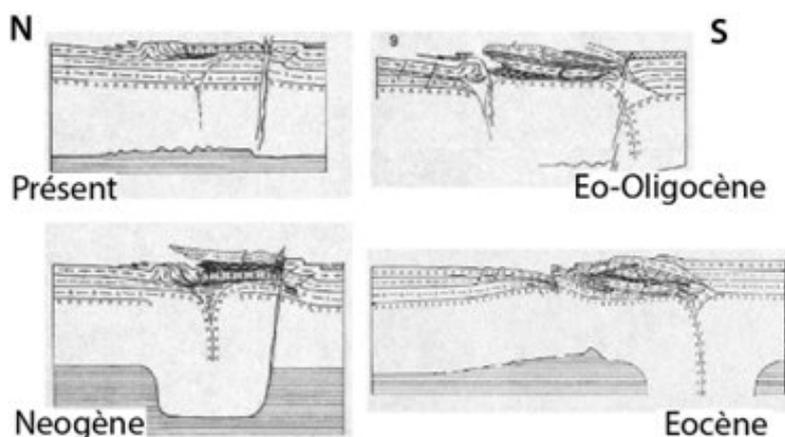


Fig. 9. LAUBSCHER (1969). Sélection de coupes parmi une plus grande série, retraçant l'évolution de la chaîne alpine du Jurassique au Présent, en montrant diverses subductions, détachements de slab et collision. Ces coupes fortement inspirées par les nouveaux concepts de la tectonique des plaques, sont très schématiques et ne prennent pas en compte les structures bien connues de l'empilement des nappes alpines, décrites avec beaucoup de détails depuis le début du XX^e siècle.

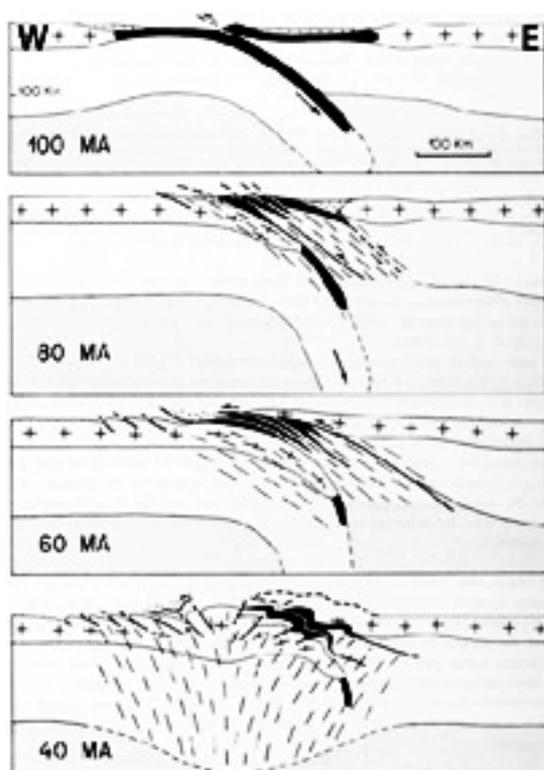


Fig. 10. MATTAUER et TAPPONNIER (1978). Cette série de coupes montre l'évolution des Alpes du Jurassique à l'Éocène supérieur. Les étapes géodynamiques moins bien contraintes sont clairement et simplement représentées, alors que les phases plus récentes, mieux contraintes par toutes les études de la structure actuelle de la chaîne ne sont pas représentés du tout.

Les articles qui ont suivi l'effort de Laubscher, proposant des évolutions de l'orogénèse alpine en coupe (DIETRICH, 1976 ; MATTAUER et

TAPPONNIER, 1978), utilisent une forme d'abstraction semblable à celle appliquée par Laubscher à propos des structures crustales

Alpines (Fig. 10). C'est-à-dire qu'on reconnaît des systèmes en subduction et collision dans leurs coupes (Fig. 10), mais aucune des géométries représentées ne nous permet de reconnaître plus spécifiquement la chaîne alpine. Les deux articles (DIETRICH, 1976 ; MATTAUER et TAPPONNIER, 1978), montrent une évolution géodynamique qui commence au Jurassique, continue avec la subduction et se termine au début de la collision, c'est-à-dire autour de 30-40 Ma. Cette représentation est tout à fait étonnante, car la seule étape réellement connue – et même de façon très détaillée – celle actuelle, est absente de l'illustration et n'est donc pas intégrée et reliée à l'évolution géodynamique proposée. L'impression est que les auteurs ont bien saisi les principes fondamentaux de la tectonique des plaques et qu'ils ont bien compris que les Alpes sont générées par la convergence de plaques au cours d'un processus de subduction/collision, mais qu'ils n'ont pas été en mesure d'intégrer les structures crustales alpines connues dans leur schéma géodynamique. En conclusion, ces modèles évolutifs discutés et illustrés par des coupes sont avant tout la représentation graphique du concept de la subduction et de la collision en général, mais non l'illustration de l'histoire spécifique des Alpes qui a conduit à un empilement d'unités paléogéographiques désormais bien définies, chacune caractérisée par un ensemble de nappes. Le point de départ de ces travaux est un concept : celui de la tectonique des

plaques. Le point d'arrivée devrait être la chaîne alpine avec sa structure spécifique, mais ce point d'arrivée n'est aucunement atteint. Ces coupes restent donc l'illustration schéma-tique d'un concept général.

2.3.3. L'intégration des données géophysiques et tectoniques : les années 1980 à 1990

Ce n'est qu'à partir de la fin des années 1960 (GIESSE *et al.*, 1968) que la communauté géophysique présente des données solides sur la structure profonde des Alpes, et ce n'est qu'au cours des années 1980-1990 (ROURE *et al.*, 1989 ; PFIFFNER *et al.*, 1990 ; SCHMID *et al.*, 1996) que ces nouvelles données apportent une image cohérente et claire de la structure profonde des Alpes (Moho et croûte inférieure), tout le long de la chaîne. Les données les plus importantes pour les coupes alpines sont certainement le pendage et la profondeur du Moho (GIESSE *et al.*, 1970), mais aussi la présence de réflecteurs crustaux de premier ordre (SCHMID *et al.*, 1996). La coupe proposée par ces derniers (Fig. 11) n'est pas la première à donner une représentation intégrée de la structure crustale alpine en détail et de la structure profonde interprétée sur la base de réflecteurs sismiques, mais elle montre de manière rigoureuse et détaillée le lien entre les structures crustales majeures et les structures profondes fournies par l'imagerie géophysique.

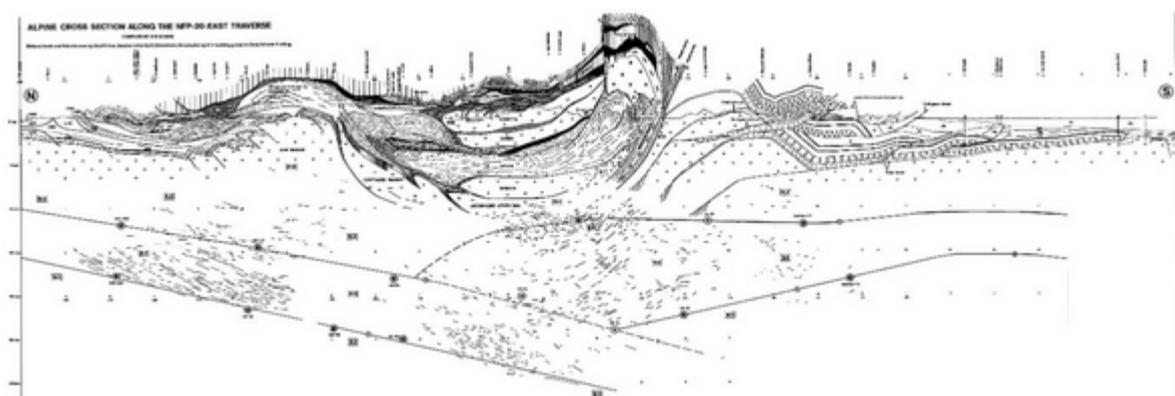


Fig. 11 SCHMID *et al.* (1996). Coupe N-S à travers les Alpes centrales. Cette coupe intègre les données lithologiques et structurales de surface et les données de la sismique réflexion pour établir la géométrie de la croûte inférieure et du Moho.

Cette période historique est caractérisée par la volonté de revenir à la description de la structure crustale observée et à l'extrapoler en profondeur grâce aux observations géophysiques. Les modèles évolutifs de cette période sont, eux aussi, inspirés par les concepts de la tectonique des plaques, mais ils partent de la structure crustale et lithosphérique telle qu'elle est connue (par exemple SCHMID *et al.*, 1996).

2.4. Le XXI^e siècle

2.4.1. L'avènement de la tomographie sismique

La technique de tomographie sismique fait son apparition dans l'imagerie alpine au début du XXI^e siècle (LIPPITSCH *et al.*, 2003 ; Fig. 12). Ces nouvelles images ont l'avantage d'illustrer la structure alpine profonde de manière continue dans l'espace sur l'ensemble de toute la chaîne et de fournir des coupes à la fois horizontales et verticales. Contrairement à la sismique plus classique, qui se concentre sur très peu de tracés linéaires, la tomographie nous renseigne sur tout plan horizontal ou vertical traversant l'orogène. Indépendamment des grands débats générés par ces images, leur interprétation est différente de celle de la sismique réflexion/réfraction, plus classique. Cette dernière caractérise des réflecteurs et leur géométrie, censés correspondre à une structure géologique de même profondeur et pendage. En revanche, les anomalies de vitesse imagées par la tomographie ne coïncident que dans certains cas avec des structures géologiques, plusieurs facteurs pou-

vant être à l'origine de ces irrégularités : différences de composition chimique/minéralogique, différence de températures entre deux domaines, ou encore la présence de fluides. En d'autres termes, la nature de l'objet représenté par l'image tomographique n'est pas univoque. Dans le cas des études alpines, c'est à travers des gradients de vitesse « anormaux » que des structures tectoniques sont identifiées et interprétées. Lorsque les interfaces entre domaines de vitesses sismiques plus lentes et plus rapides se trouvent en position « inverse » par rapport à un modèle d'équilibre standard, elles sont interprétées comme correspondant à des discontinuités tectoniques de premier ordre, correspondant souvent à des panneaux lithosphériques subductés. Toutefois, pour arriver à cette conclusion, il faut d'abord interpréter les images de la lithosphère et/ou de l'asthénosphère avec un modèle pour déterminer si les différences de vitesse représentent des différences de composition chimique, de température ou à la présence de fluides. Si l'on a de bonnes raisons de croire qu'il s'agit de variations de température, alors les géométries résultant des domaines de vitesses différents sont interprétées grâce au modèle de la tectonique des plaques. Les domaines d'anomalie de vitesses rapides sont généralement considérés comme représentant des panneaux lithosphériques en subduction. Il s'agit donc d'utiliser un modèle conceptuel (tectonique des plaques) pour interpréter un modèle de vitesses, qui est lui-même déjà interprété en termes de paramètres physiques (T vs chimie/minéralogie, fluides).

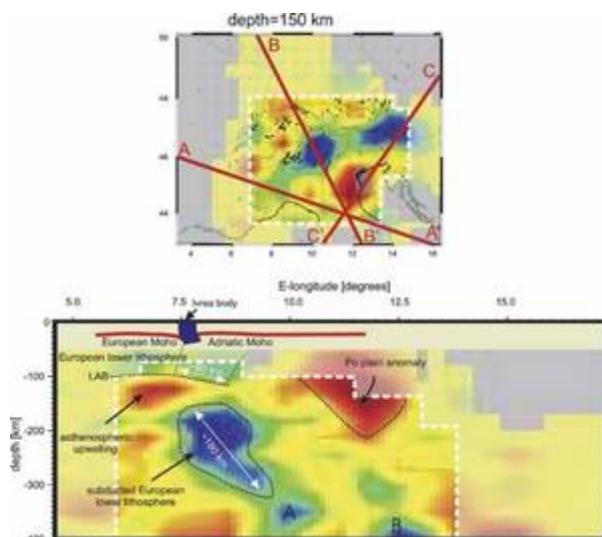


Fig. 12 LIPPITSCH *et al.* (2003). Tomographie sismique (ondes P) de la chaîne alpine illustrée par une coupe horizontale de profondeur 150 km et une coupe verticale NW-SE.

3 Discussion et conclusions

L'évolution historique retracée ci-dessus montre des changements notables dans le rapport et l'importance relative attribuée à l'observation et à l'interprétation des structures géologiques dans les coupes réalisées entre les XVIII^e et XXI^e siècles. La toute première phase de construction des coupes géologiques est caractérisée par une reproduction fidèle de la nature (Fig. 1 ; MARSIGLI, 1705 ; SCHEUCHZER, 1708), sans apport d'aucune interprétation de la part des scientifiques ou, tout au moins, sans apport conscient d'interprétation de leur part. Les couches et structures observées ne sont pas extrapolées au-dessus ou en dessous de la surface topographique pour établir leur continuité dans l'espace. Les limites des couches ne sont pas modifiées dans le but de corriger les effets de la topographie qui déterminent des variations locales du pendage apparent. Enfin, la nature lithologique des couches n'est pas précisée et indiquée dans la représentation. Il s'agit véritablement la reproduction de paysages bien choisis pour caractériser des structures géologiques, exposant des couches et structures le long de flancs de vallée assez raides, mais sans aucun ajout conceptuel.

C'est au début de la seconde moitié du XVIII^e siècle (Fig. 2 ; ARDUINO, 1752) que ce genre d'illustrations est radicalement modifié et la nature lithologique des couches est interprétée, représentée et légendée. L'observation est donc complétée par le résultat de l'analyse et de l'interprétation du scientifique.

Au cours de la première moitié du XIX^e siècle, ce complément conceptuel dépasse la seule détermination lithologique des roches et transforme l'image purement observée dans une image qui ne reproduit plus fidèlement celle observée dans la nature. Les effets des irrégularités de la surface topographique sont corrigés et une interpolation, même si encore timide, des couches en profondeur commencent à se réaliser (STUDER, 1834 ; Fig. 3b). La conscience de dépasser la pure représentation de la nature afin de faire place à une composante interprétative est très forte chez les scientifiques de l'époque, comme le démontre la volonté de

Studer (1834) de dupliquer ses coupes en couleur, l'une représentant fidèlement la nature telle qu'elle est observée, l'autre proposant une représentation (légèrement) interprétée. Pour que cette différence soit parfaitement claire et transparente, l'auteur (STUDER, 1834, Fig. 3a,b) nomme ces représentations, respectivement « coupe » (*Profil*) et « coupe conceptuelle » (*Ideales Profil*).

La partie conceptuelle, interprétative, gagne rapidement en importance dans la seconde moitié du XIX^e siècle, où l'on voit paraître des coupes représentant des surfaces entièrement planes et verticales (VON DER LINTH, 1850), totalement interprétées jusqu'à un niveau de base horizontal, bien en dessous de la surface topographique (MURCHISON, 1850). Cette étape est rapidement suivie par des interprétations qui franchissent la surface topographique vers le haut (Fig. 4 ; LORY, 1860 ; FAVRE, 1867 ; GIORDANO, 1869 ; HEIM, 1878 ; BERTRAND, 1884), permettant ainsi de clarifier la complexité des structures et les débats associés à leurs interprétations (Fig. 5, 6, 7 ; HEIM, 1878 ; BERTRAND, 1884 ; SCHARDT, 1893). Représenter l'interprétation géométrique de la continuité latérale des couches, à la fois au-dessus et en dessous de la surface topographique, revient à montrer comment chaque couche présente à un endroit de la surface topographique se poursuit latéralement dans l'espace, de manière continue d'un bout à l'autre de la coupe. De cette manière, ce qui est invisible pour l'observateur de la nature est représenté en coupe, afin de créer un lien entre des observations distinctes et géométriquement isolées. Par exemple le dessin d'une charnière de pli au-dessus ou en dessous de la surface (Fig. 4), qui relie deux affleurements séparés de la même couche. Ce nouvel exercice s'accompagne d'un déplacement progressif de l'intérêt scientifique de la description et la documentation de l'objet vers la compréhension et l'explication de ce qui a été décrit. Ce déplacement s'accompagne aussi de l'apparition de grands débats autour des interprétations qui ne sont acceptées à l'unanimité qu'après des décennies (SCHARDT, 1904).

L'évolution de la technique de construction des coupes, qui inclue les projections latérales de structures de surface à partir du début du XX^e siècle (Fig. 8 ; LUGEON, 1902 ; ARGAND, 1916)

amène une nouvelle révolution : l'image de la coupe est construite en y projetant des observations qui ne proviennent pas du tracé de la coupe, mais de régions qui peuvent être localisées à plusieurs dizaines de kilomètres de ce tracé. Autrement dit, la coupe n'illustre plus, par principe, ce qu'il serait possible de voir dans un plan vertical, le long d'un tracé donné, mais une synthèse 2D inexistante dans la nature, d'un volume important de croûte. Le succès de cette nouvelle façon de dessiner les coupes se voit dans leur adoption par de nombreux auteurs travaillant sur différentes régions de la chaîne alpine (HEIM, 1908 ; STAUB, 1924 ; LUGEON, 1934). Ce ne sont donc plus des observations directes de la nature que l'on représente, mais des constructions complexes, considérées représenter au mieux la nature.

Alors que le rapport entre observation directe et interprétation conceptuelle semble pencher de plus en plus du côté conceptuel, ce sera Laubscher (1969) qui exprimera de manière très explicite de quelle manière le scientifique moderne doit établir le lien entre ces deux processus. Il déclare qu'il est impossible de réaliser des observations sans avoir déjà en tête un modèle conceptuel *a priori*³. C'est-à-dire que le principe de STUDER (1834) consistant à reproduire fidèlement la nature en y ajoutant éventuellement une légère interprétation est totalement renversé, en considérant que c'est le modèle conceptuel, donc l'interprétation, qui guide notre observation ! Cette constatation de Laubscher (1969) se fait au moment où la théorie de la tectonique des plaques commence à être acceptée dans les modèles d'interprétation de la chaîne alpine. Dans le même temps, on observe que l'intérêt de la communauté scientifique se déplace de la reconstruction géométrique précise de la chaîne, au sens d'Argand (1909 ; 1916) vers des schémas explicatifs très fortement influencés par les nouveaux modèles de subduction et collision (DIETRICH, 1976 ; MATTAUER et TAPPONNIER, 1978), mais sans lien géométrique étroit avec les structures alpines documentées depuis plus d'un siècle. L'évolution temporelle de la chaîne de montagnes est montrée dans ces dernières études en partant

des stades plus anciens, schématisés à partir des concepts de la tectonique des plaques. Cette approche est diamétralement opposée à celle d'Émile Argand (1916), qui part de l'état actuel (Fig. 8) de la chaîne alpine, le seul qui soit réellement connu, et, étape par étape, le rétro-déforme afin de remonter en arrière dans le temps (Fig. 8). L'observable est le point de départ. À l'inverse, les publications des années 1970 partent du modèle conceptuel générique. Plus Argand remonte en arrière dans le temps et plus il s'éloigne de l'observation (ARGAND, 1916 ; Fig. 8). Sa reconstruction devient plus spéculative et, à ce stade, il a besoin lui aussi d'un soutien conceptuel plus fort. Il se base alors sur le modèle des géoantclinaux varisques (ARGAND, 1916), mais les premières étapes de sa reconstruction ne prennent en compte que le dépliage de la structure actuelle.

Pour résumer, la part de l'observation est fortement réduite dans les coupes alpines de la première phase de la tectonique des plaques. Ce concept étant très puissant, capable de créer un lien simple entre magmatisme, métamorphisme, sédimentation et tectonique, on lui attribue une position dominante sur l'observation. Un retour sur le devant de la composante observationnelle se fait avec les nouvelles données géophysiques relatives à la structure profonde de la chaîne, qui sont intégrées aux données de géologiques de surface (Fig. 11 ; ROURE *et al.*, 1989 ; PFIFFER *et al.*, 1990 ; SCHMID *et al.*, 1996).

C'est avec la tomographie sismique qu'un tout nouveau jeu de données permettant d'interpréter la structure lithosphérique/asthénosphérique (Fig. 12 ; LIPPITSCH *et al.*, 2003 ; SCHMID *et al.*, 2004 ; PAFFRATH *et al.* 2021) et crustale profonde de la chaîne (KÄSTLE *et al.*, 2020 ; NOUBAT *et al.*, 2022), renouvelle l'intérêt de la communauté scientifique à l'égard de l'étude de la structure profonde des Alpes et du lien de celle-ci avec la croûte superficielle. Mais ces données ne sont pas l'image directe des structures que l'on souhaite cartographier. Pour dessiner ces dernières, il faut d'abord interpréter la cause physique des anomalies de vitesse de la tomographie, puis leur explication « géologique ».

³ De fait, les épistémologues ont expliqué depuis belle lurette que croire qu'une démarche est véritablement scientifique dès lors qu'elle ne s'appuie que sur des faits accumulés en dehors de toute idée préconçue relève de ce qu'ils appellent *l'inductivisme naïf*.

Cette dernière interprétation se fait sur la base d'un modèle géodynamique qui est lui-même entièrement issu de la tectonique des plaques. C'est-à-dire que, contrairement à l'interprétation cinématique argandienne, l'interprétation n'est pas dérivée directement de l'image de la structure géologique, mais d'une théorie développée indépendamment de cette image, tacitement considérée comme étant toujours valable. Cette théorie est donc l'outil fondamental, non remis en cause, qui permet d'interpréter l'image sismique. Cette dernière est interprétée comme le résultat de différences de T dans la lithosphère et asthénosphère. Par l'observation des images

tomographiques, nous sommes donc confrontés à une donnée qui a besoin d'être doublement interprétée par des modèles conceptuels : d'une part un modèle concernant les paramètres physiques qui déterminent les changements de vitesse sismique, d'autre part un modèle tectonique, celui de la tectonique des plaques, lequel nous permet de donner une lecture géodynamique à l'image tomographique. Le nombre de strates d'interprétation a donc fortement augmenté par rapport à l'observation directe et la source de ses couches ne procède plus directement de l'objet observé.

Bibliographie

- ARDUINO, G. (1752). Lithostratigraphic cross-section of the Agno Valley, near Vicenza (dated October 1758): in *Biblioteca Civica, Verona – "Fondo G. Arduino"*, b. 760, IV.c.11. Arduino...Due lettere sopra varie osservazioni naturali dirette al Prof. A. Vallisneri).
- ARGAND, E. (1909). *L'exploration géologique des Alpes pennines centrales. Bull. Soc. Vaudoise Sci. nat.*, **45**, 217-276.
- ARGAND, E. (1916). *Sur l'arc des Alpes occidentales. Eclogae geologicae Helvetiae*, **14**, 145-191.
- BÜCHI, U.P. and TRÜMPY, R. (1976). Bemerkungen zum geologischen Profil längs der Geotranverse Basel-Chiasso. *Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen*, **56**, 589–603.
- DEBELMAS, J., ANTOINE, P., ARNAUD H., GIDON, M., KERCKHOVE, C., DESMONS, J., FUDRAL, S., and GRANDCHAMP, P. (2011). *L'exploration géologique des Alpes franco-italiennes. Presses des Mines*, 252 p.
- DIETRICH, V. (1976). Evolution of the Eastern Alps: A plate tectonics working hypothesis. *Geology*, **4**, 147-152.
- ESCHER VON DER LINTH, A., (1850), In MURCHISON, R.I. (1850). Ueber den Gebirgsbau in den Alpen, Apenninen u. Karpathen, namentlich um einen Uebergang aus sekundären Gebilde in tertiäre darzuthun, u. über die Entwicklung eocener Ablagerung im südlichen Europa: Bearbeitet von Gustav Leonhard. Verlag B. Müller, Stuttgart, 162 p.
- FAVRE, A. (1867). *Recherches géologiques dans les parties de la Savoie, du Piémont et de la Suisse voisines du Mont-Blanc. Editions Victor Masson et Fils, Paris*, p. 587.
- GIESE, P. (1968). Die Struktur der Erdkruste im Bereich der Ivrea-Zone. Ein Vergleich verschiedener seismischer Interpretationen und der Versuch einer petrographisch-geologischer Deutung. *Schweiz. Mineral. petrogr. Mitt.*, **48**, 261-284.
- GIESE, P., GÜNTHER, K., REUTTER, K. (1970). Vergleichende geologische und geophysikalische Betrachtungen der Westalpen und des Nordapennins. *Z. deutsch. geol. Ges.*, **120**, 151– 105.
- GIORDANO, F. (1869). Sulla orografia e sulla geologica costituzione del Gran Cervino. *Atti R. Acc. Sci. Torino*, **4**, 304–321
- GORTANI, M., (1930). Idee precorritrici di Luigi Ferdinando Marsigli su la struttura dei monti. In Corbelli, A. and Marsiliano, C., eds.: *Memorie intorno a Luigi Ferdinando Marsigli. Nicola Zanichelli, Bologna*, p. 257-
- HEIM, A. (1878). Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung im Anschluss an die geologische Monographie der Tödi-Windgällen-Gruppe. Basel, 246 p;
- HEIM, A. (1908). Der Bau der Schweizer Alpen, *Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, **110**, 3–26.
- KÄSTLE, E.D., ROSENBERG, C., BOSCHI, L., BELLAHSEN, N., MEIER, T. et EL-SHARKAWY, A. (2020). Slab break-offs in the Alpine subduction zone. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* **109**, 587–603. <https://doi.org/10.1007/s00531-020-01821-z>
- LAUBSCHER, H.P. (1969). Mountain building. *Tectonophysics*, **7**, p. 551-563.
- LAUBSCHER, H.P. (1970). Bewegung und Wärme in der alpinen Orogenese. *Schweiz. Mineral. petrogr. Mitt.*, **50**, p. 503-534.

- LIPPITSCH, R., KISSLING, E., ANSORGE, J. (2003). Upper mantle structure beneath the Alpine orogen from high-resolution teleseismictomography. *J. Geophys. Res.* 108, 2376. <http://dx.doi.org/10.1029/2002JB002016>.
- LORY, C. (1860). Description géologique du Dauphiné (Isère, Drome, Hautes Alpes), première partie.
- LUGEON, M. (1902). Les grandes nappes de recouvrement des Alpes du Chablais et de la Suisse. *Bull. Soc. géol. France* (4), n° 1, p. 723-825
- LUGEON, M. (1934). Guide géologique de la Suisse, Fasc. I, Préface. B. Wepf & Cie., Basel.
- MATTAUER, M., et TAPPONNIER, P. (1978). Tectonique des plaques et tectonique intracontinentale dans les Alpes franco-italiennes, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 287, p. 899-902.
- MURCHISON, R.I., (1850). Ueber den Gebirgsbau in den Alpen, Apenninen u. Karpathen, namentlich um einen Uebergang aus sekundären Gebilde in tertiäre darzuthun, u. über die Entwicklung eocener Ablagerung im südlichen Europa: Bearbeitet von Gustav Leonhard. Verlag B. Müller, Stuttgart, 162 p.
- NOUBAT ET AL. (2022). Lithospheric transdimensional ambient-noise tomography of W-Europe: implications for crustal-scale geometry of the W-Alps, *Geophysical Journal International*, 229, (2), p. 862–879.
- PAFFRATH, M., FRIEDRICH, W., SCHMID, S. M., HANDY, M. R., and the AlpArray and AlpArray-Swath D Working Group (2021). Imaging structure and geometry of slabs in the greater Alpine area – a P-wave travel-time tomography using AlpArray Seismic Network data, *Solid Earth*, 12, p., 2671-2702.
- PIFFNER, O.A., FREI, W., VALASEK, P., STAEUBLE, M., LEVATO, L., DUBOIS, L., SCHMID, S. M. and SMITHSON, S.B. (1990). Crustal shortening in the Alpine orogen: results from deep seismic reflection profiling in the eastern Swiss Alps, Line NFP 20 East. *Tectonics*, 9, p. 1327-1355.
- ROSENBERG, C.L. (2023). Alpine sections through time: a mirror of evolving observations and thoughts on the tectonics of the Alps. In ROSENBERG et BELLAHSEN (Eds.): *Geodynamics of the Alps*, ISTE, Wiley, 356 p.
- ROURE, F., P. CHOUKROUNE, X. BERSASTEQUI, J.A. MUNOZ, A. VILLIEN, P. MATHERON, M. BAREYT, M. SEURET, P., CAMARA and J. DERAMOND (1989). Ecore deep seismic data and balanced cross sections: Geometric constraints on the evolution of the Pyrenees *Tectonics*, 8, 41-40.
- SCHARDT, H. (1893). Coup d'oeil sur la structure géologique des environs de Montreux. *Eclogae Geol Helv*, IV, p. 29-43.
- SCHARDT, H. (1898). Les régions exotiques du versant Nord des Alpes suisses (Préalpes du Chablais et du Stockhorn et les Klippes): leurs relations avec l'origine des blocs et brèches exotiques et la formation du Flysch. *Bulletin de la Société vaudoise des sciences naturelles*, 34, p. 113-219.
- SCHARDT, H. (1904). Note sur le profil géologique et la tectonique du massif du Simplon. *Eclogae Geol Helv*, VIII, n° 2, p. 173-199.
- SCHEUCHZER J. (1708). De montium structura, lettre envoyée à l' "Académie des Sciences de Paris", copiée dans le manuscrit H92 de la Zentral Bibliothek de Zurich; celui-ci contient (p.30-39) le texte en latin de Orographia, de Helvetiae Stoicheiographia de Johann Jakob Scheuchzer.
- SCHMID, S.M., FÜGENSCHUH, B., KISSLING, E. and SCHUSTER, B. (2004). Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae geol. Helv.* 97, 93–117. <https://doi.org/10.1007/s00015-004-1113-x>
- SCHMID S. M., PFIFFNER, O.A., FROITZHEIM N., SCHÖNBORN, G., and KISSLING, E (1996). Geophysical-geological transect and tectonic evolution of the Swiss-Italian Alps. *Tectonics*, doi.org/10.1029/96TC00433
- SENGÖR, C., (2003). The repeated discovery of mélanges and its implications for the possibility and the role of objective evidence in the scientific enterprise. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 373, 385-445.
- STAUB, R. (1924). Bau der Alpen. *Beiträge zur Geologische Karte der Schweiz NF*, 52, P; 1–272.
- STUDER, B. (1834). Geologie der westlichen Schweizer-Alpen, Ein Versuch. Druck und Verlag Karl Groos, Heidelberg und Leipzig, 420 p.
- TRÜMPY, R. (2001). Why plate tectonics was not invented in the Alps. *International Journal of Earth Sciences*, 90, 477–483.