

Zeitschrift: Mémoires de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles
Band: 13 (2021)

Artikel: Histoire de la connaissance géologique du Jura franco-suisse
Autor: Malvesy, Thierry / Tripet, Jean-Pierre / Schaer, Jean-Paul
Kapitel: 3: Tectonique, structure et généralités
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1055688>

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: 24.11.2025

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

3^e PARTIE

TECTONIQUE, STRUCTURE ET GÉNÉRALITÉS

JEAN-PAUL SCHAER & THIERRY MALVESY

**avec des contributions de ANNA SOMMARUGA,
MICHEL CAMPY, JON MOSAR, JACQUES MUDRY, FRANÇOIS PASQUIER
& JEAN-PIERRE TRIPET**

Chapitre 1

Les Pionniers (avant 1840)

Les premières recherches géologiques attestées entreprises dans le Jura sont celles du Français Louis Bourguet (1678-1742). Ce savant mathématicien, philosophe et éditeur réside à Neuchâtel dès 1715; il y enseigne la philosophie et les mathématiques à partir de 1731. Sur le plan de la géologie, son rayonnement local, ses contacts avec des pasteurs naturalistes locaux (Pierre Quartier (?-1759), pasteur à la Chaux-du-Milieu et Deluze, pasteur à Valangin) et des médecins naturalistes (Abraham Gagnebin (1727-1817), De la Ferrière) sont la source d'une émulation géologique régionale, principalement orientée vers la recherche de fossiles dans le but de constituer des cabinets de curiosités. Les écrits de L. Bourguet évoquent essentiellement les grands principes de la géologie: la formation des roches, des cristaux et la présence de fossiles; son *Traité des pétrifications* (BOURGUET, 1742) dresse ainsi un inventaire couvrant l'ensemble de la Terre. Dans le Jura neuchâtelois, il fait état de quelque trente-huit localités où des fossiles ont été reconnus mais en ne donnant que rarement des informations sur la localisation précise de ces gisements et sur leur environnement géologique. La chronologie de L. Bourguet est biblique et englobe les quelque quatre mille ans qui nous séparent du Déluge. Par rapport à cette donnée, les phénomènes géologiques sont extrêmement lents et confirment la stabilité de la Terre. Il reconnaît que le comblement du lac de Neuchâtel par l'alluvionnement de ses rivières va demander des centaines de milliers d'années. À ses yeux, de telles considérations illustrent les limites de l'étude des phénomènes récents pour comprendre ceux du passé, plus qu'elles ne l'engagent à abandonner les bases de sa chronologie biblique.

1. 1. Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799)

Dans son œuvre posthume, Jules Thurmann (1804-1855) déclare :

«Les opinions orographiques des observateurs avant de Saussure sont, relativement au Jura, à peu près

nulles ou supportent à peine l'examen: inutile donc de s'y arrêter» (THURMANN, 1857, p. 13).

Aujourd'hui encore, H.-B. de Saussure apparaît comme le premier naturaliste ayant abordé de façon sérieuse la structure géologique du Jura. Cette contribution, intégrée dans la première partie de ses *Voyages dans les Alpes* (DE SAUSSURE, 1779-1796) n'a cependant pas connu le même impact que ses commentaires consacrés à la chaîne alpine; bien que marqué par d'abondantes observations claires et objectives, elle n'a pas l'élan et les audaces des recherches alpines de l'auteur. L'analyse de la structure du Jura comporte de très nombreuses observations et réflexions provenant de plusieurs secteurs de la chaîne et donne une attention particulière à la région du Salève et aux montagnes proches de Genève qui lui sont particulièrement familières. Cette contribution manque malheureusement d'illustrations: cartes, croquis et profils. Cette lacune, face à la diversité des constats précis mais dispersés, a certainement été préjudiciable pour que l'auteur parvienne à imposer une vision synthétique claire et rationnelle de la chaîne. Elle a par contre agi comme un modèle fixant la façon dont les études régionales pouvaient être abordées et a permis de nombreuses recherches de prendre appui sur des données présentes dans cette grande œuvre, comme ce fut le cas pour le questionnement sur les glaciers. De Saussure reconnaît à la chaîne du Jura son caractère d'un pays de roches sédimentaires calcaires, plissées, formant une suite d'anticlinaux et de synclinaux marchant parallèlement les uns avec les autres, pour former un large croissant dont la corde orientée SW-NE s'étend du sud du département de l'Ain, vers Cerdon, jusque dans la région du Bözberg au nord de Brugg, entre Zürich et Bâle; à l'ouest, la chaîne est limitée par la Bresse (Lons-le-Saunier, Salins, Vesoul), alors que sa face sud-est longe le Bassin molassique tertiaire de la Suisse. De Saussure en fait déjà une annexe des Alpes:

«Le Jura, quoique séparé des Alpes par une vallée de plusieurs lieues de largeur, pourrait

cependant être regardé comme une dépendance de leurs chaînes extérieures; deux raisons me le persuadent. Le Jura marche à peu près parallèlement aux Alpes et que sa partie la plus élevée est située du côté des Alpes, et qu'il s'abaisse graduellement à mesure qu'il s'en éloigne» (DE SAUSSURE, 1779-1796, vol. 1, p. 267).

Il reconnaît qu'à l'intérieur de la chaîne, les assises qui tapissent le fond des profondes vallées sont souvent de même nature que celles rencontrées dans les plaines adjacentes où elles sont situées à des altitudes inférieures. Cette constatation implique une continuité entre les strates des vallées internes et celles des paysages environnants, en même temps qu'elle propose en évidence un soulèvement global de la chaîne par rapport à son environnement.

Dans toute la chaîne, de Saussure porte une grande attention à l'orientation des strates et surtout à leur pendage. Avec une certaine réserve, il admet que les couches sédimentaires qui en forment l'ossature, révèlent, par leur inclinaison, avoir subi une déformation postérieure à leur genèse.

«J'ai cru pendant long-tems [sic] que toutes les couches doivent avoir été formées dans une situation horizontale, ou peu inclinée à l'horizon, & que celles que l'on rencontre dans une situation ou perpendiculaire ou peu inclinée, avoient été mises dans cet état par quelque révolution; mais à force de rencontrer des couches dans cette situation, de les voir dans des montagnes bien conservées, & d'observer une grande régularité dans la forme & dans la direction de ces couches, je suis venu à penser que la Nature peut bien aussi avoir formé de ces bancs très-inclinés [sic], & même perpendiculaires à la surface de la terre» (DE SAUSSURE, 1779-1796, vol. 1, p. 277).

Ces dernières considérations paraissent assez étonnantes du fait qu'elles viennent de celui qui, par son étude des conglomérats redressés de Vallorcine en 1776, a apporté la preuve irrévocable du redressement tectonique des couches sédimentaires (DEBELMAS, 2011). Nous y voyons une attestation flagrante des incertitudes qui caractérisent encore, à cette époque, les premières investigations structurales. Pour de Saussure, les flancs des montagnes du Jura sont très souvent marqués par des assises verticales orientées parallèlement à la chaîne alors que celles

des crêtes sont ordinairement faiblement inclinées et couronnent les reliefs par des couches; ces dernières forment de vastes voûtes où des structures marquées par un brusque basculement des pendages évoquant le toit d'une maison au niveau de son faite. Il signale également la présence de plis de faible rayon de courbure (plis disharmoniques), mais sans en saisir la signification. Par rapport à la structure, la morphologie externe des montagnes est souvent transformée de façon sensible par les effets de l'érosion qui les entame. Il note qu'au niveau de la première chaîne bordant le Bassin molassique, les couches qui s'élèvent vers les sommets possèdent souvent des inclinaisons plus modérées que celles qu'on rencontre sur leurs flancs escarpés orientés au nord-ouest. Une telle disposition dissymétrique est également reconnue dans les reliefs bordant les paysages de la Bresse; là, des pentes douces en direction du sud-est passent au-delà des faites à des escarpements marqués par des couches redressées. Ces observations, comme celles relatives à la structure du Salève, représentent la première reconnaissance de la prédominance des plis à «*regard français*» que J. Thurmann développera par la suite.

De Saussure place le Salève dans le cadre du Jura; il y consacre une étude particulièrement attentive en notant que les couches calcaires qui en forment le faite sont sensiblement horizontales. De cette position, en direction de son flanc sud-est, elles se poursuivent avec une pente douce qui ne devient plus raide qu'au bas de la pente, où elles passent sous les assises de la Molasse. Dans la face nord-ouest de ce chaînon dominant la ville de Genève, les couches forment une impressionnante et abrupte falaise dont la partie sommitale est constituée par des formations subhorizontales qui passent rapidement et sans transition à des couches verticales, même renversées localement, qui se poursuivent jusqu'à son pied; c'est là probablement la première présentation d'un pli-faille. Au faite du relief, en direction du sud-ouest, les couches forment une voûte qui recouvre la structure interne. De part et d'autre de ce chaînon, émergeant les séries de la Molasse avec une direction SW-NE, de Saussure reconnaît que les assises sommitales s'inclinent transversalement de part et d'autre de son allongement, soulignant ainsi le bombement axial de cette structure anticlinale.

1. 2. Qualité des cartes topographiques disponibles

Pour de Saussure :

« Les chaînes de montagnes dont le Jura est composé, ne sont pas continues d'une extrémité à l'autre; elles sont coupées en divers endroits. Mais les échancrures ou crénelures qui les divisent, ne descendent guères [sic] qu'au tiers de leur hauteur: les gorges les plus basses par lesquelles on traverse le Jura, sont toujours très-élevées au-dessus des plaines, situées de part et d'autre de la montagne » (DE SAUSSURE, 1779-1796, vol. 1, p. 268).

Il ne donne ainsi que peu d'attention aux cassures et décrochements qui découpent transversalement la chaîne tout entière, ainsi que le chaînon du Salève. La mauvaise topographie dont il dispose, *La Carte du lac de Genève et des montagnes adjacentes* (fig. 19) qui accompagne sa description trace ainsi, au niveau du bassin genevois une étrange continuité structurale en forme d'arc de cercle où se succéderaient Mont Salève, Mont du Vuache et le Reculet. Cette présentation topographique fantaisiste a pu troubler le regard attentif de De Saussure en le conduisant à ignorer des éléments structuraux qui paraissent actuellement si évidents. Ce document donne à nouveau à la chaîne du Salève une insolite continuité latérale, avec d'étranges ondulations transversales qui s'étendent de la cluse de l'Arve à l'est, jusqu'au-delà de Cruseilles à l'ouest. Il faudra attendre les travaux d'Etienne Joukowsky (1869-1948)¹ et Jules Favre (1882-1959), pour que ces géologues établissent eux-mêmes une carte de qualité de la région du Salève, leur permettant ainsi d'en donner une représentation topographique acceptable (fig. 20; JOUKOWSKY & FAVRE, 1913).

Basé sur leurs propres relevés photogrammétriques, assurés par de nombreux points cotés

établis au baromètre, ce document permet enfin la publication d'une carte géologique de qualité à 1:25 000, complétée par deux cartes à 1:160 000 (une topographique et une structurale) très suggestives, illustrant le découpage de ce chaînon par des décrochements.

Le problème du découpage de la chaîne du Salève reste encore ignoré par Alphonse Favre (1815-1890) qui, lui aussi, s'est trouvé mal servi par la carte topographique dont il disposait (FAVRE, 1843), établie sur un dessin d'Émile Gautier (fig. 21).

La carte orographique du Jura d'Amans Gressly (1814-1865)², publiée en 1840, (fig. 22) représente un autre exemple des lacunes de l'information topographique (GRESSLY, 1837-1841).

L'auteur qui a séjourné à Neuchâtel a certainement été impressionné par les relations qui s'observent souvent entre une chaîne majeure (anticlinaux) et des structures plus modestes qui semblent s'en détacher comme une branche par rapport au tronc d'un arbre. Ne disposant pas d'une cartographie précise, il propose des relations de filiation semblables existantes entre les différentes chaînes formant le Jura qui auraient toutes progressé à partir d'un tronc central qu'il situe dans la région argovienne. De cette zone centrale et vitale, la chaîne aurait étendu ses branches majeures en direction de l'ouest (chaîne du Weissenstein-Chasseral et chaîne du Mont Terrible) d'où se seraient détachées des branches secondaires. Dans la région de Neuchâtel, qu'A. Gressly connaît bien, sa schématisation garde un certain contact avec la réalité, mais au-delà, en direction du nord, on entre dans le domaine de la fantaisie qui ne peut être contrôlée que par des cartes de qualité qui à cette époque ne sont pas disponibles.

Plus tard, l'amélioration des données topographiques a largement bénéficié des exigences formulées par des ingénieurs chargés de l'aménagement des lignes ferroviaires. Les travaux géologiques, croquis, cartes, qui doivent être établis dans ce cadre, doivent répondre aux exigences des ingénieurs; elles conduisent à l'établissement de documents où les échelles horizontales et verticales sont enfin équivalentes (DESOR & GRESSLY,

¹ Une note biographique consacrée à E. Joukowsky est intégrée dans un travail de Édouard LANTERNO (2000). Cet article donne un aperçu des personnalités qui ont contribué à la vie scientifique genevoise du XVIII^e siècle à l'époque contemporaine, dans le domaine de la géologie. Plusieurs d'entre elles sont mentionnées dans la partie « Hydrogéologie » pour leur apport dans le domaine des eaux souterraines.

² Voir éléments biographiques in SCHAEER (1998).

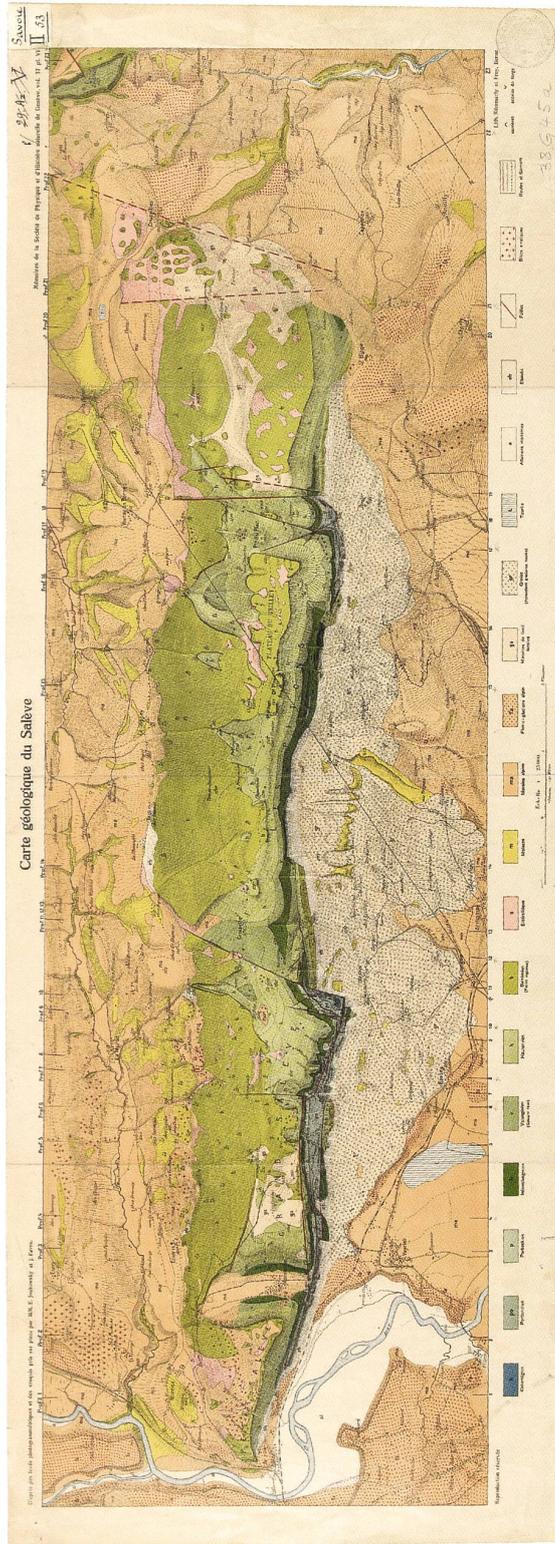


Fig. 20 : Carte géologique du Salève tirée de *Monographie géologique et paléontologique du Salève (Haute-Savoie)*. Extrait de Etienne JUKOWSKY et Jules FAVRE en 1913.

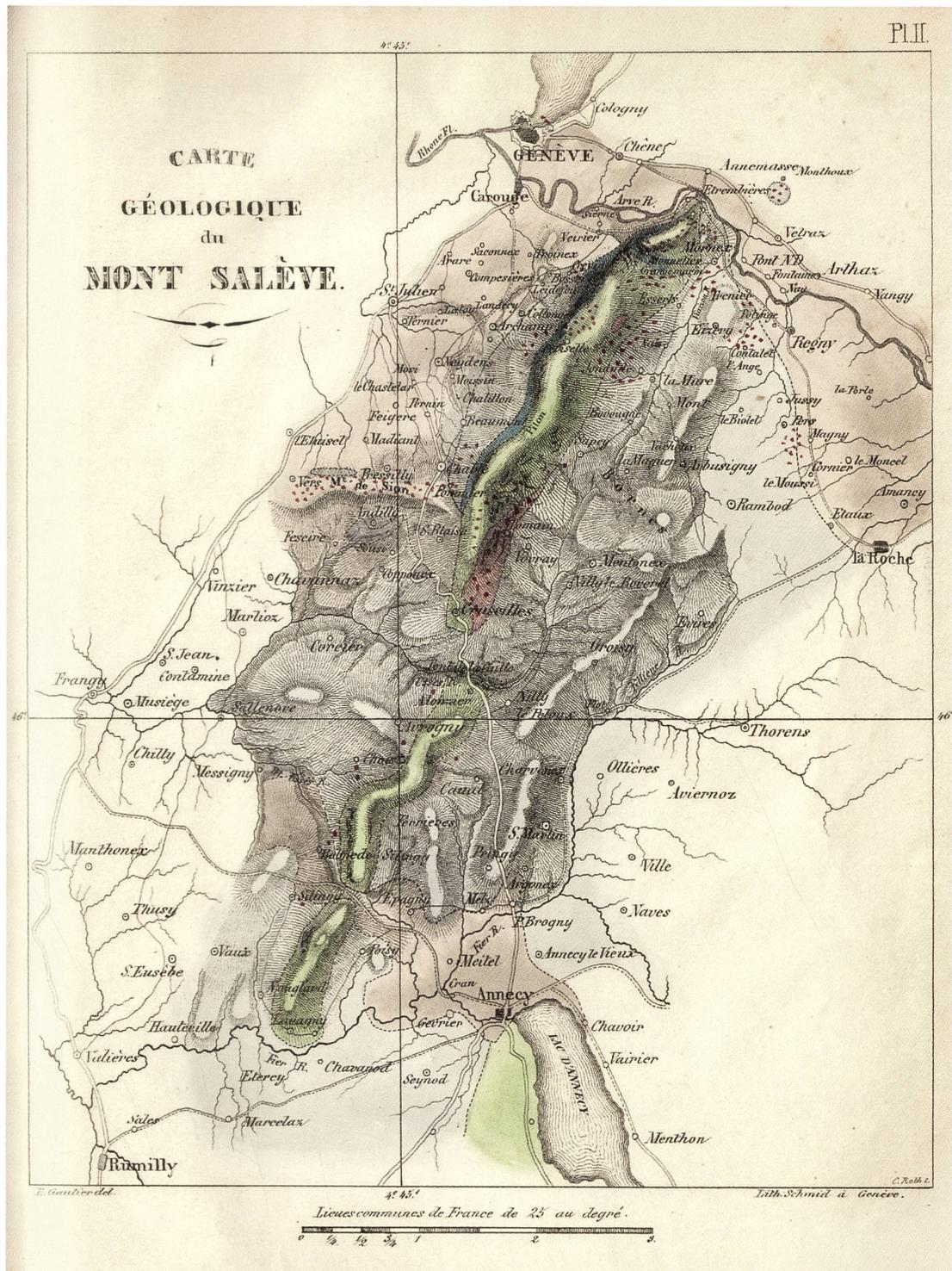


Fig. 21 : Carte géologique du Mont Salève tirée de *Considérations géologiques sur le mont Salève, et sur les terrains des environs de Genève*. Extrait de Alphonse FAVRE en 1843, sur un dessin d'Émile Gautier.

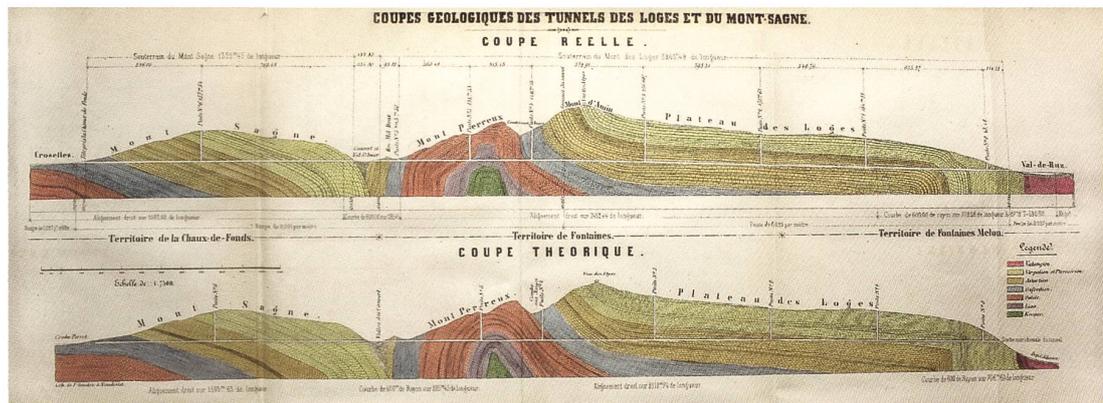


Fig. 23 : Coupes géologiques des tunnels des Loges et du Mont Sagne au 1:7500 tirées de *Études géologiques sur le Jura neuchâtelois*. Extrait de DESOR ET GRESSLY en 1859.

1859). Cette modification entraîne la disparition des pics topographiés escarpés qui abondent dans les illustrations géologiques anciennes du Jura, mais ne disparaissent totalement que par des représentations où les échelles horizontales et verticales sont équivalentes contrairement à la perception humaine qui donne des valeurs plus élevées aux distances verticales qu'elle ne le fait pour celles situées dans le plan horizontal (fig. 23, 24, 25).

On doit souligner ici l'apport de Bernhard Studer (1794-1887), premier président de la Commission géologique suisse, qui a très tôt entrepris des démarches auprès du Service topographique suisse pour obtenir une meilleure représentation de la topographie en zone de montagne afin que le géologue puisse y figurer avec précision les lignes générales et les détails qu'il observait dans la nature.

Dans son étude sur « La structure du Jura », le français Emmanuel Jacquin de Margerie (1862-1953), insiste également sur la nécessité de disposer de bonnes cartes topographiques pour l'appréciation des structures dans les chaînes plissées (DE MARGERIE, 1909). Il souligne l'inappréciable avantage que les géologues suisses possèdent en ayant à leur disposition des cartes topographiques détaillées, où le relief du sol est exprimé par des lignes de niveau. Dans le Jura français, les cartes géologiques au 1:50 000, avec courbes de niveaux, n'apparaîtront qu'en 1925.

Johann Gottfried Ebel (1764-1830), un auteur connu pour ses guides touristiques, ainsi que pour ses analyses des coutumes et institutions suisses, publiée, au début du XIX^e siècle, deux volumes qui se rapportent essentiellement à l'analyse de la chaîne alpine (EBEL, 1808). Cet ouvrage a fait l'objet d'une étude en 2000 (FRANKS *et al.*, 2000). Le Jura n'y est que sommairement traité en soulignant que la chaîne est tout de même reconnue comme étant formée par des assises calcaires et marneuses qui se distinguent nettement de celles des Alpes. Ces roches, localement oolitiques, sont ordinairement très claires et accompagnées de niveaux marneux; dans la zone sud-ouest, les calcaires prennent assez souvent des teintes jaunes (Crétacé). J. G. Ebel reconnaît également la présence de l'erratique sur la bordure interne du Jura de même que la disposition des couches en forme de voûte conduit à l'édification d'une suite de rides presque parfaitement parallèles, mais non continues, qui couvrent l'ensemble du Jura, en devenant moins nombreuses à partir du bord sud-ouest des Vosges et du Fossé rhénan.

Le Zurichois Hans Conrad Escher von der Linth (1767-1823) présente le Jura dans ses *Ansichten und Panoramen der Schweiz: Die Ansichten 1780-1822* en donnant principalement des commentaires sur les roches et leur stratigraphie. Les structures font l'objet de profils brièvement commentés. L'absence de continuité des structures, plis de synclinaux, de part et d'autre du décrochement de Pontarlier, visible sur la carte (fig. 26) est

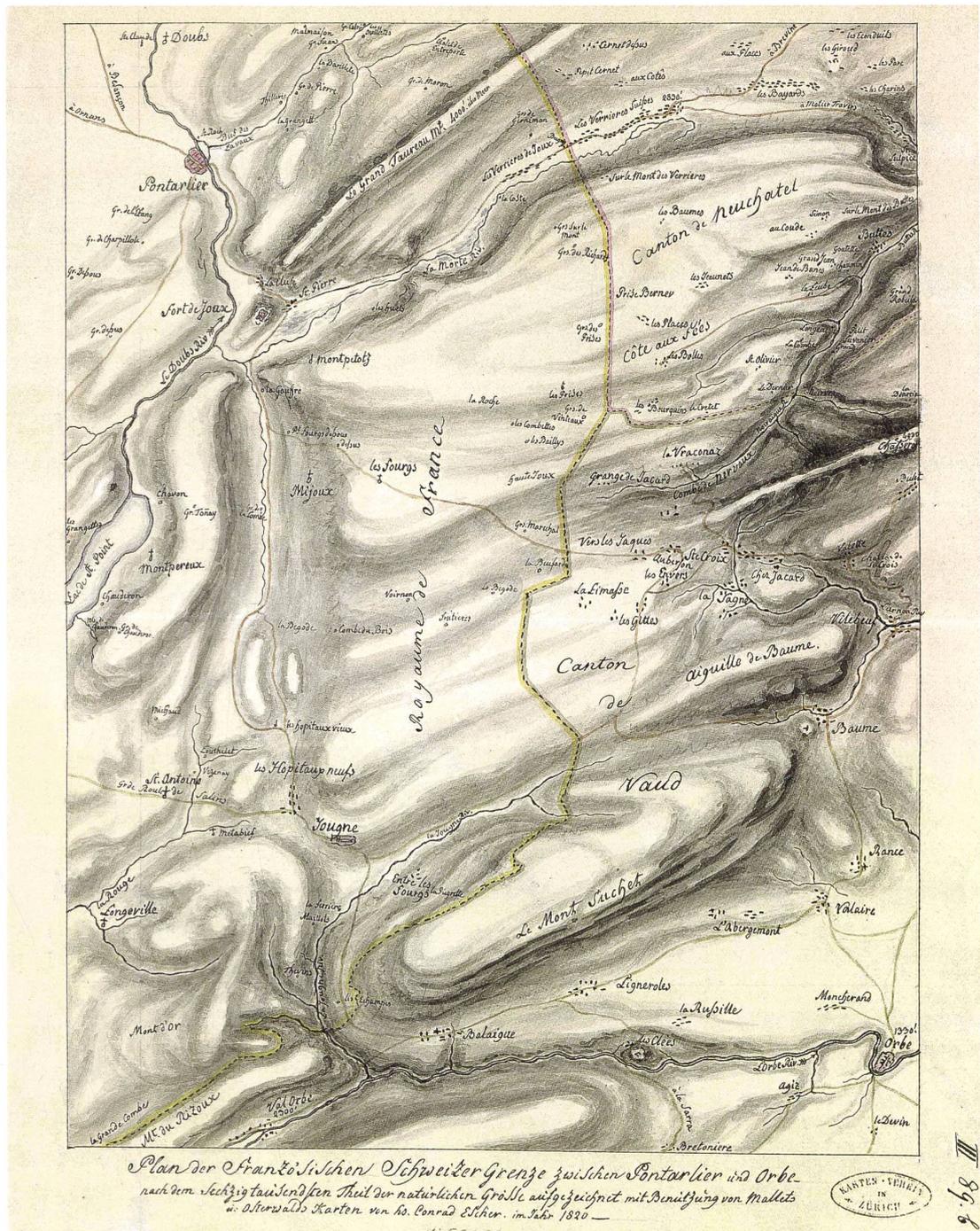


Fig. 26: Plan de la frontière franco-suisse près de Pontarlier et de l'Orbe. Tiré de *Ansichten und Panoramen der Schweiz: Die Ansichten 1780-1822*. Extrait de Hans Conrad Escher von der Linth, 1974.

reconnue par H. C. Escher von der Linth ; mais son origine n'est pas associée à un décrochement, type de structure inconnu à cette époque. H. C. Escher von der Linth tient néanmoins à souligner que ses observations de la bordure méridionale de la chaîne montrent que le Jura et les Alpes ne forment pas deux chaînes parallèles comme cela est trop souvent admis (ESCHER VON DER LINTH, 1780-1822, éd. 1974).

Au cours des premières décennies faisant suite à l'ouvrage de De Saussure *Voyage dans les Alpes précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève* (1779-1796), deux importants chercheurs, Jean André Deluc et surtout Léopold von Buch (1774-1853) apportent d'importantes contributions centrées sur le Jura neuchâtelois.

1. 3. Jean-André de Luc, ou Deluc (1727-1817) dans le Jura

Le savant genevois J. A. Deluc visite le Jura neuchâtelois et les régions avoisinantes en 1782, dans le cadre d'un vaste tour entrepris à travers l'Allemagne et la Suisse, alors qu'il est lecteur de la reine Charlotte d'Angleterre (DELUC, 1813). Dans cette visite, il a la possibilité d'examiner les couches calcaires inclinées, parfois même redressées à la verticale, pour se prononcer sur les raisons de cette situation, et d'examiner les nouvelles propositions de De Saussure qui vient de montrer que les assises conglomératiques verticales de Vallorcine se sont formées à l'horizontale et qu'elles ne furent redressées qu'à la suite des grands bouleversements alpins. Dans le Jura, J. A. Deluc utilise la position des fossiles dans les strates calcaires pour assurer que celles-ci se sont formées en position horizontale et que les basculements qu'elles ont subis sont associés eux aussi aux perturbations subies par la chaîne, sans qu'on en connaisse l'origine.

S'inspirant de propositions de René Descartes (1596-1650), il juge que la planète Terre s'est formée en emmagasinant en son sein d'importantes quantités de fluides ; certaines s'y trouvent encore bloquées, sous de hautes pressions, au niveau de vastes cavernes situées dans les niveaux externes de l'enveloppe terrestre. À la faveur de catastrophes, ces gaz sous pression parviennent à gagner l'atmosphère en arrachant les roches dites

primitives formant la croûte terrestre profonde. Sous l'effet de ces violentes explosions, qui s'accompagnent d'importantes baisses de pression, les voûtes des cavernes ne parviennent plus à soutenir la croûte qui s'effondre alors que l'ensemble du pays se trouve encore en zone marine. Il se forme alors de profondes dépressions dont l'une est représentée par le lac de Neuchâtel et qu'une autre est située au niveau du Val de Travers ; les combes latérales qui bordent ces paysages situent les cicatrices d'où sont sortis les gaz et les roches cristallines profondes qu'on retrouve actuellement sous la forme de dépôts où abondent de gros blocs et des pierres arrondies. Pour J. A. Deluc, la cluse du Fort de Joux, à l'est de Pontarlier, et surtout le cirque du Creux du Van avec ses strates horizontales sur la plus grande partie de son extension, butant au nord sur les niveaux verticaux, sont une parfaite illustration de la subsidence qui a modelé l'ensemble des structures régionales.

Dans le Jura neuchâtelois, J. A. Deluc accorde une attention soutenue à l'écoulement des eaux en pays karstique. Il fait état ainsi des importantes variations du débit du torrent intermittent de Saint-Martin qui prend sa source au pied des reliefs bordant le flanc nord du synclinal du Val de Ruz, dans une zone d'éboulis locaux et alpins. Alors qu'en temps normal cette zone d'émergence est à sec, elle se transforme lors de la fonte des neiges ou lors d'orages soutenus et répétés en un torrent débitant d'importantes quantités d'eau, interprétées comme étant le trop-plein des écoulements drainant vers la profondeur les apports d'un assez vaste secteur des reliefs à l'amont. En temps normal, l'écoulement souterrain est facilement évacué par les fissures élargies des assises calcaires, alors qu'en période de hautes eaux l'évacuation souterraine est rapidement dépassée. Les eaux excédentaires ne pouvant plus s'infiltrer en profondeur gagnent la surface. Les populations locales, admettent que le drainage est normalement assuré en profondeur par un réseau de fissures ouvertes qui se poursuit à travers tout le synclinal du Val de Ruz et que, finalement, elles alimentent la source karstique de la Serrière là où celle-ci, après un très bref parcours en surface, se jette dans le lac de Neuchâtel.

J. A. Deluc identifie les autres sources vaudoises que sont l'Areuse à Saint-Sulpice, la

Noiraigue avec son bassin perché de la vallée des Ponts ainsi que les exutoires alimentant le Doubs depuis la région du Locle et de La Chaux-de-Fonds. Il remarque que l'ensemble du paysage du Jura neuchâtelois est marqué par un réseau de cours d'eau de surface très peu développé. Cette situation est la conséquence des grandes facilités d'infiltration des eaux vers la profondeur à la faveur des très nombreuses fractures et fissures ouvertes que présentent les assises calcaires de ces régions. Les études de J. A. Deluc sur la circulation des eaux à l'intérieur des montagnes calcaires du Jura sont commentées plus loin dans Hydrogéologie, chap. 2.2.1.

J. A. Deluc commente également la pratique de l'amendement des maigres sols situés sur les niveaux calcaires, qui est effectué par l'épandage de marnes. Cette pratique, qui favorise la croissance des herbages, présente un intérêt supplémentaire pour le géologue du fait que les marnes, surtout celles de l'Hauterivien, assez compactes, qu'on exploite par cette pratique, perdent leur fermeté par les effets de l'altération et du gel en mettant au jour leur important contenu de fossiles.

1. 4. Léopold von Buch (1774–1853) à Neuchâtel³

Vers la fin du XVIII^e siècle, des habitants de la petite localité du Locle mettent au jour des lits charbonneux dans les environs immédiats de cette petite cité horlogère. Désireux d'exploiter cette découverte, ils adressent une demande au roi de Prusse, qui était alors le prince du pays de Neuchâtel. Pour clarifier la situation, celui-ci décide d'envoyer sur place son conseiller pour les questions minières le jeune Léopold von Buch ; il n'a alors que vingt-six ans mais bénéficie déjà d'une excellente réputation acquise par ses études à la fameuse École des Mines de Freiberg (où il

comptait Alexandre von Humboldt (1769-1859) parmi ses amis) et par des recherches où il s'est distingué dans différents aspects des sciences de la Terre.

La visite de L. von Buch à Neuchâtel de 1800 à 1802, ne conduit à aucun développement économique mais elle fut riche d'enseignement pour la connaissance géologique du Jura en général et, tout particulièrement, pour celle de la région neuchâteloise, avec des retombées qui s'étendent jusque dans les régions alpines.

Dans le cadre de ses activités officielles, L. von Buch montre que les charbons du Locle sont de mauvais combustibles qui se situent entre des tourbes et des lignites. Provenant de l'évolution d'une végétation de marais situés sur la bordure d'une petite cuvette lacustre tertiaire très récente, ils se réduisent à de minces filons de très faible extension. Au-delà de cette recherche de caractère économique, von Buch dresse un catalogue de cent cinquante-neuf roches prélevées à travers l'ensemble du territoire de la principauté (VON BUCH, 1803a). Il en donne une description pétrographique établie à l'aide de la loupe, en précisant la couleur et le contenu éventuel en fossiles, et de l'orientation des assises où ces échantillons furent prélevés, en ajoutant des commentaires sur la structure régionale et l'éventuel intérêt économique. Il montre que certains niveaux particuliers présentent de grandes extensions latérales qui permettent de placer ces couches dans le cadre général de la suite des formations présentes dans la principauté. L'information est abondante mais permet rarement de se faire une idée précise des relations géologiques existant entre les différents prélèvements. On notera les commentaires sur les gisements d'asphalte du Val de Travers où il souligne qu'on est en présence d'une imprégnation de bitume dans les pores de roches riches en débris de fossiles qui apparaissent nettement sous l'effet de l'altération ou du feu. Il juge que le bitume a plutôt une origine issue du règne animal plutôt que de végétaux dont on ne retrouve aucune trace dans ces niveaux. Il signale aussi que des traces bitumineuses sont également présentes dans des niveaux comparables sur la bordure nord du lac de Neuchâtel. Cet important catalogue met à la disposition de futurs chercheurs une large somme d'informations utiles mais sans songer à faire apparaître une image synthétique

³ La présentation des nombreux sujets abordés par von Buch lors de son passage à Neuchâtel en 1802-1803 est variée, certaines publiées de son vivant, d'autres dans des notes manuscrites. Le tout fut ultérieurement publié dans l'édition des œuvres complètes : *Gesammelte Schriften, Herausgegeben* de J. EWALD *et al.*, 1867, p. 688-695, pl. XII et XIII.

régionale ou même locale. C'est cependant dans le cadre de cette recherche qu'il va présenter les premiers profils mettant en valeur la structure et la morphologie des anticlinaux du Jura.

Par sa reconnaissance de la région des gorges du Seyon toutes proches de Neuchâtel, L. von Buch est l'auteur d'un profil transversal et d'un profil longitudinal de l'anticlinal de Chaumont au niveau des gorges du Seyon très proches de Neuchâtel (fig. 27, VON BUCH 1803b, pl. XIII).

La structure transversale est établie avec l'aide des pendages observés et de deux niveaux marneux qui soulignent la morphologie régionale en faisant ressortir le crêt de la Pierre jaune (château de Neuchâtel) et celui des formations valanginiennes, au-dessus des marnes du Purbeckien. Dans le profil longitudinal, la présence des couches à gastéropodes Nérinées, anciennement appelés *Strombites*, peut être suivie depuis les gorges du Seyon jusque dans la région du sommet de Chaumont où elles sont pratiquement horizontales comme elles le sont à l'ouest du Gibet (ces dernières données ne sont pas figurées sur le profil de L. von Buch). Il n'en reste pas moins que L. von Buch présente ici pour la première fois l'illustration de la descente axiale d'un anticlinal. Il complète cette vue locale en présentant un profil traversant tout le Jura, allant des Alpes bernoises jusqu'à Besançon et au massif de la Serre (VON BUCH, 1803b). En accord avec les idées de son temps et conformément aux propositions de l'Allemand Abraham Gottlob Werner (1749-1817), les roches granitiques, dites primitives, forment le soubassement de l'édifice (fig. 28). Sous l'effet des déformations ayant affecté la croûte, elles apparaissent en surface dans les Alpes bernoises ainsi qu'au niveau du massif de la Serre. Elles sont surmontées par des assises calcaires sombres (Lias de la bordure de la Bresse et calcaires sombres alpins) qui sont censées représenter les formations de transition. Celles-ci sont à leur tour surmontées par les formations secondaires grises au-dessus desquelles trône le Jura avec ses pierres blanches, elles-mêmes recouvertes par la Molasse tertiaire. On retiendra l'audace de cette proposition, même si le Jura plissé y occupe une étrange position.

L. von Buch s'intéresse également à l'hydrologie ; il signale que les sources de la région neuchâteloise

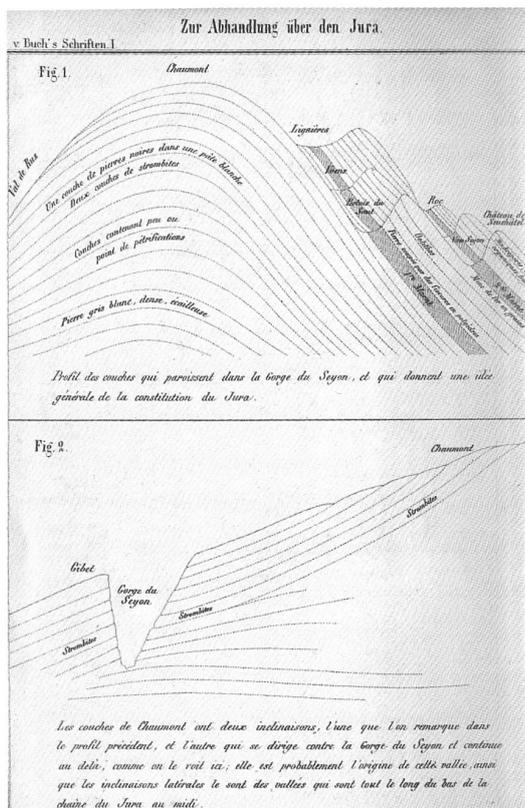


Fig. 27 : Disposition des couches entre les gorges du Seyon et Chaumont. *Zur Abhandlung über den Jura*. Extrait de *Catalogue d'une collection des roches qui composent les montagnes de Neuchâtel*, tiré de Léopold VON BUCH, 1803a.

présentent des températures relativement fraîches avec des variations relevant de celles des saisons. Il relève que la source froide du Creux du Van se distingue par sa température quasi constante, proche de 4°C ; cette particularité, liée à la présence de permafrost dans cette région du Creux du Van, n'a été reconnue que récemment.

Le petit article que L. von Buch a consacré au Val de Travers (VON BUCH, 1803c) est principalement destiné à contester les vues de J. A. Deluc qui voulait faire de cette vallée une zone effondrée. Pour L. von Buch, cette idée est contraire aux observations montrant que le fond du synclinal est occupé par des assises crétacées, localement horizontales, qui s'appuient sur les flancs des anticlinaux bordant la vallée.

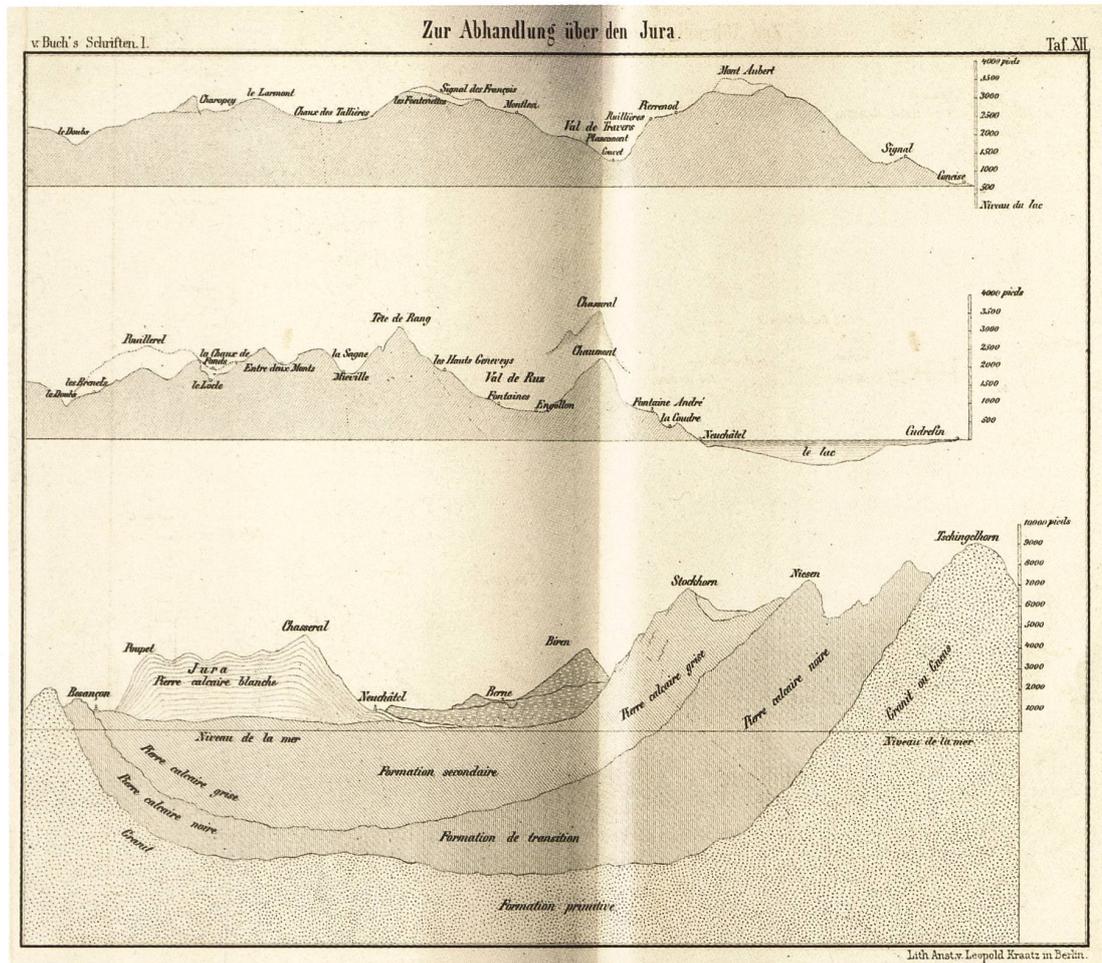


Fig. 28 : Coupes à travers le Jura franco-suisse. Zur Abhandlung über den Jura. Extrait de *Catalogue d'une collection des roches qui composent les montagnes de Neuchâtel*, tiré de Léopold Von Buch, 1803a.

Chapitre 2

Plis de soulèvement vs théorie des refoulements

2. 1. Jules Thurmann (1804–1855) : les plis de soulèvement

Les premiers travaux cherchant à caractériser les plis du Jura évoquent la forme en voûte des anticlinaux et soulignent les fonds plats des synclinaux, situés dans les secteurs où ils se trouvent éloignés de deux plis les enserrant. L'introduction de l'idée de soulèvement favorise ainsi des présentations et des esquisses, où l'idée d'intrusion issue de la profondeur impose des géométries reflétant cette dynamique. Les coupes d'anticlinaux du Jura bernois, dessinées par le jurassien Jules Thurmann (fig. 29), donnent une image claire et facilement assimilable des diversités morphologiques produites par ces structures dans lesquelles les niveaux calcaires massifs forment des crêtes pointant vers le ciel, alors que les niveaux marneux se situent dans les dépressions morphologiques: les combes (THURMANN, 1836a). Très proche de l'observation de terrain, cette illustration peut servir à souligner autant l'idée d'érosion que celle d'intrusion. Cette dernière est renforcée par une figuration où l'échelle des hauteurs se trouve exagérée par rapport à celle des distances horizontales. Les structures ouvertes et dégagées des charnières où la trace axiale est soulignée, renforcent encore l'idée d'intrusion.

Les propositions de la formation des plis et de leur soulèvement par des apports magmatiques que J. Thurmann publie en 1832 dans l'*Essai sur les soulèvements [sic] jurassiques du Porrentruy* accompagné par la *Carte orographique et géologique du Jura bernois* extraite du second cahier de *Essai sur les soulèvements jurassiques* en 1836, représentent un document fondamental de la recherche structurale du Jura, en même temps qu'un changement capital de l'esprit dans lequel cette analyse est conduite. Cette carte n'est ni plus ni moins que la « *Carte de l'ancien Évêché de Bâle* » de Antoine-Joseph Buchwalder (1792-1883) de 1819, sur laquelle J. Thurmann a surligné les différentes unités géologiques :

« [L'auteur] pourra donner la belle carte du Jura Bernois, de M. Buchwalder, coloriée

géologiquement, et accompagnée du texte et des coupes, à un prix peu supérieur à celui auquel cette carte isolée s'est vendue jusqu'à présent dans le commerce. » (fig. 30, THURMANN, 1832, 1836a).

Alors que la plupart de ses prédécesseurs, comme H.-B. de Saussure et ceux qui le suivirent, donnaient la priorité à la description des faits, J. Thurmann place l'hypothèse du soulèvement à la base de son analyse du plissement de la chaîne. Au-delà de la cartographie géologique et des profils qui l'accompagnent, ses travaux visent à vérifier si la théorie de base qu'il propose donne une cohérence à l'ensemble et aux détails du paysage jurassien qu'il analyse. Aux yeux de l'auteur, la réponse positive que reçoit sa démarche confirme le bien-fondé de l'hypothèse. La morphologie qu'il décrit avec ses crêtes, ses combes, ses ruz, ses cirques, ses voûtes et ses cluses s'ordonne si parfaitement avec sa cartographie régionale qu'elle apporte confirmation de la théorie de départ. Dès que ce résultat est acquis, et rapidement partagé par de nombreux collègues sensibles à l'excellente argumentation de l'auteur, cette démarche modifie totalement la conduite de la plupart des géologues opérant dans le Jura. Ils sont de plus en plus conduits à abandonner l'observation des seuls faits en dehors de toute idée préconçue; ils les évaluent en fonction du modèle des soulèvements qui devient désormais leur guide.

Séparées par moins d'un demi-siècle, les deux approches de H.-B. de Saussure et de J. Thurmann, toutes deux largement dépendantes des travaux de terrain, permettent ainsi de situer les importants progrès qui ont été réalisés au niveau de la géologie locale en un demi-siècle. La connaissance locale ou régionale a nettement progressé, grâce surtout à une meilleure perception des successions lithologiques rencontrées, elle-même de mieux en mieux assurée par une connaissance des faunes présentes dans les différents terrains. La disponibilité de meilleures cartes topographiques permet ainsi d'assurer une

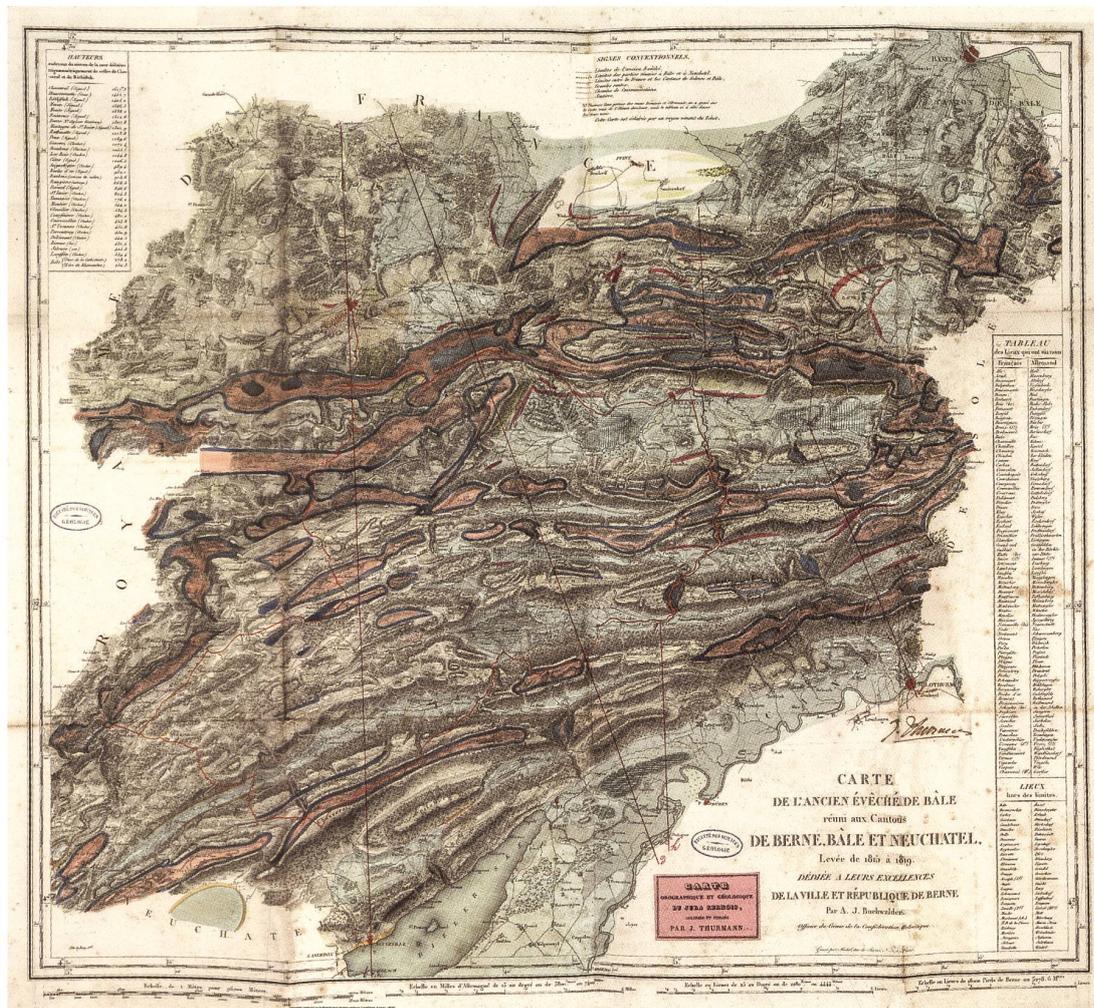


Fig. 30 : Carte de l'ancien Évêché de Bâle de Antoine-Joseph Buchwalder de 1819, sur laquelle J. Thurmman a surligné les différentes unités géologiques. Tirée de *Essai sur les soulèvements jurassiques – second cahier, comprenant la carte orographique et géologique des soulèvements du Jura bernois, accompagnée d'une description systématique*. extrait de J. THURMANN, 1836a.

meilleure transcription des observations de terrain. Dans cette évolution, on doit reconnaître la modeste influence exercée par les travaux de H.-B. de Saussure et de ses successeurs. La très grande surface couverte par leurs investigations, la dispersion des données structurales recueillies, ne sont pas parvenues à imposer une vision synthétique, que de Saussure avait souhaitée : les données locales n'ont que rarement été mises en relation avec les grands ensembles ; cette approche n'a pas facilité l'émergence de structures claires sur lesquelles d'autres recherches auraient pu se greffer.

Alors que de H.-B. de Saussure privilégie l'observation en dehors de toute idée préconçue, J. Thurmman impose dès le départ l'idée

« que les chaînes jurassiques sont des soulèvements affectant des formes déterminées, normales, susceptibles d'être classées en ordre distincts d'après des configurations dépendantes de la nature des affleurements [sic] et de l'énergie des agents [sic] plutoniques, et de décrire les accidents [sic] réguliers orographiques qui les constituent ». (THURMANN, 1832, p. 3)

Pour parvenir à ce but, J. Thurmann choisit d'étudier et de cartographier la région proche de Porrentruy où il est établi. Cette démarche offre l'avantage de situer son étude dans la partie médiane de la chaîne, proche des secteurs étudiés par Peter Merian (1795-1883) qui a donné une bonne description des lithologies présentes; elle est de plus située dans une région où l'on dispose de deux excellentes cartes topographiques, celle «*de l'ancien Évêché de Bâle*» de 1819 par A.-J. BUCHWALDER déjà évoquée et celle de Neuchâtel, publiée en 1811, par Jean-Frédéric D'OSTERVALD (1773-1850)¹. Toutes deux sont nécessaires pour mener à bien une analyse géométrique détaillée permettant ainsi d'étudier les accidents structuraux et leurs causes.

Dans son travail, J. Thurmann décrit d'abord la suite des séries sédimentaires rencontrées; du fait du plissement et de la qualité des affleurements, il estime ne rencontrer aucune difficulté pour saisir les superpositions des différentes assises. La région du Mont Terrible (actuellement Mont Terri), avec des formations allant du Trias (Muschelkalk) au Malm (Portlandien), devient sa référence stratigraphique régionale. Les données de superposition des assises obtenues sont corrélées avec les études du Français Charles Édouard Thirria (1796-1868) réalisées en Haute-Saône en 1833 et sont certifiées par d'importantes récoltes de fossiles dont les déterminations furent confirmées par Philippe-Louis Voltz (1785-1840) de Strasbourg (THIRRIA, 1833).

J. Thurmann reconnaît quatre ordres de structures plissées qui sont mis en relation avec l'intensité du soulèvement; dans cette classification, l'importance de l'érosion n'est pas prise en compte. Les données dans le Jura voisin, le conduisent à admettre que ses observations et conclusions locales peuvent s'appliquer à une région plus étendue et même couvrir l'ensemble du Jura. De plus, il pense que son approche pourrait aborder l'étude d'autres chaînes non encore étudiées, même là où l'on ne dispose que d'une topographie sommaire. Pour son auteur, la théorie du soulèvement comporte encore des zones d'ombre car

«*L'intensité de l'agent de soulèvement, son mode d'application et la nature de la résistance, sont des variables qu'il nous est impossible d'apprécier*

¹ Voir éléments biographiques in *Dictionnaire historique de la Suisse*.

séparément, mais dont le résultat du soulèvement est nécessairement une fonction. Cette fonction ou ce résultat ne peut être que de trois espèces, à savoir: une rupture, un ploiement, une combinaison de ces deux phénomènes» (THURMANN, 1832, p. 40).

Le soulèvement conduit donc à trois types de déformations: rupture, ploiement et combinaison de ces deux types d'accidents. Les ruptures s'observent jusqu'en surface, avec de possibles déplacements le long de la cassure, alors que, dans d'autres cas, elles ont retrouvé leur ancienne continuité de part et d'autre de la faille. Avec le ploiement, toute la série est affectée par la courbure des strates, ce qui donne une configuration en voûte plus ou moins régulière. La combinaison des deux déformations, conduit à une situation de ploiement dans les séries inférieures tendant à se développer en rupture dans les séries supérieures, aboutissant jusqu'à une crevasse en surface. Ces principes conduisent donc l'auteur à proposer que les plis du Jura sont le résultat de quatre ordres progressifs de soulèvement débutant par:

- 1° *Soulèvement qui n'a point fait affleurer des groupes inférieurs au Corallien (calcaires du Malm);*
- 2° *Soulèvement qui a fait affleurer l'ensemble des groupes oxfordien et oolitique (de l'Argovien au Lias supérieur);*
- 3° *Soulèvement qui a fait affleurer les terrains liasique et keupérien;*
- 4° *Soulèvement qui a fait affleurer les terrains conchyliens (Muschelkalk)*
(THURMANN 1832, p. 42).

Pour tester son hypothèse, J. Thurmann présente quatre figures théoriques (fig. 31) qui illustrent la position des assises au cours de la progression du soulèvement; celles-ci sont comparées avec les déformations observées dans le Jura. La confrontation des formes théoriques avec celles rencontrées dans la nature implique quelques adaptations qui permettent de mieux situer le contexte structural dans lequel la déformation a été agissante. J. Thurmann essaie alors de dégager neuf grandes catégories liées aux observations:

- 1° La force de soulèvement a pu avoir une direction oblique.

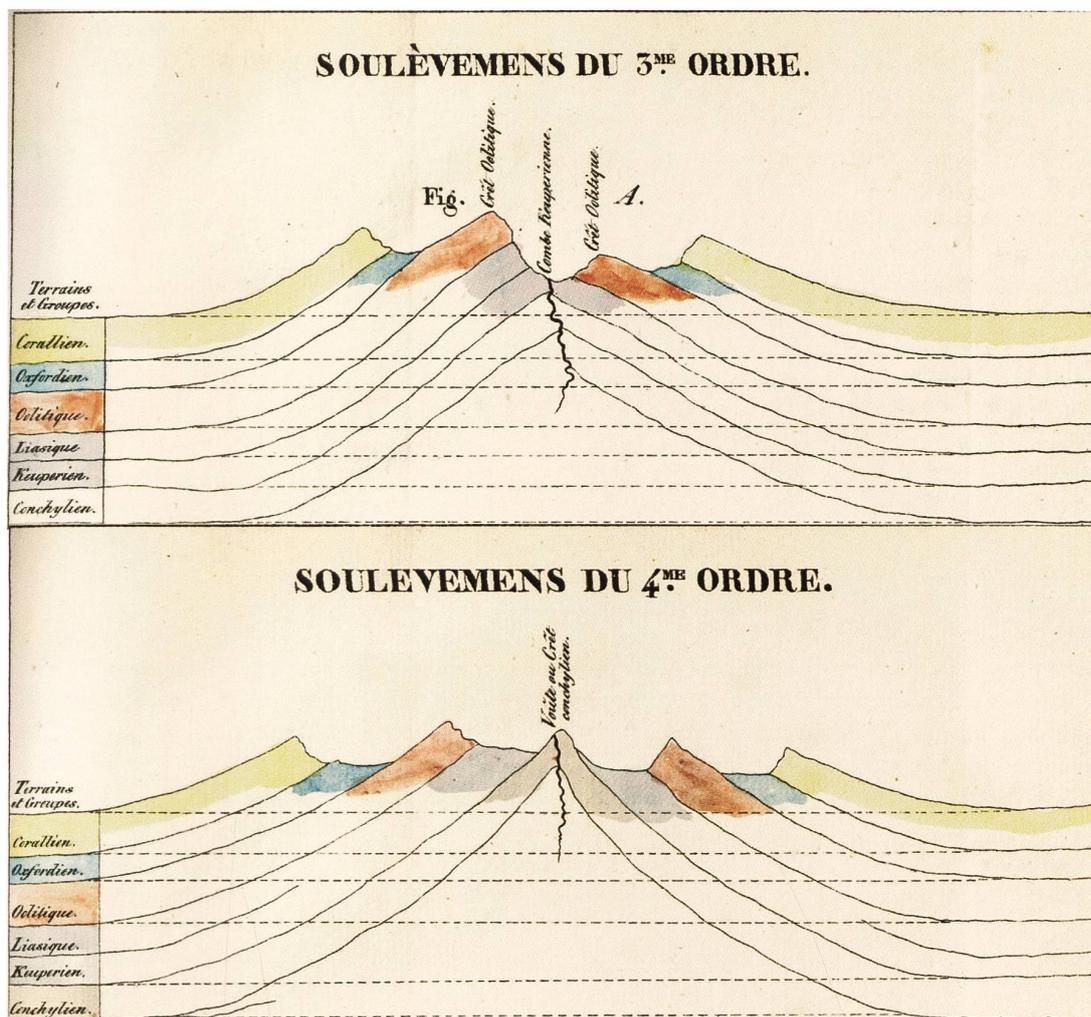


Fig. 31 : Planche illustrant deux des quatre figures (3^e et 4^e ordres de soulèvement) extraite de J. THURMANN en 1832 dans *Essai sur les soulèvements jurassiques du Porrentruy: description géognostique de la série jurassique et théorie orographique du soulèvement*.

- 2° La ligne de rupture figurée par une trace verticale a pu être anguleuse ou sinueuse.
- 3° La déformation a entraîné des fractures et des éboulements qui ont comblé des vides et couvert les pentes des zones redressées.
- 4° Les roches solides ont conservé les formes acquises, alors que les roches fragiles n'ont pu les maintenir.
- 5° Le glissement des strates les unes sur les autres et les étirements n'ont pas pu être pris en compte.

- 6° Les débris associés au plissement ont probablement été entraînés au loin par les eaux marines présentes durant le plissement.
- 7° Les masses soulevées ont subi une dessiccation durant leur plissement, conduisant à des traces de retrait.
- 8° Durant le Tertiaire, alors que la chaîne était située au milieu des eaux, des actions de destruction et d'érosion de la chaîne du Jura l'ont abaissée.
- 9° La chaîne est l'objet d'une érosion récente.

2. 2. La réunion extraordinaire de la Société géologique de France à Porrentruy en 1838

Afin de discuter plusieurs thématiques géologiques, dont celle des plis de soulèvement, s'ouvre à Porrentruy du 5 au 12 septembre 1838, la réunion extraordinaire de la Société géologique de France, sous la présidence provisoire de M. Perrin de Lunéville, doyen d'âge.

Il lui a été donné l'honneur de citer les nouveaux membres de la SGF dont, bien entendu, des Suisses (l'abbé Carabinier, professeur à Delémont, Bernhard Studer, professeur à Berne, Antoine-Joseph Buchwalder, colonel de Génie à Berne et Xavier Marchand (1799-1859), inspecteur des forêts à Porrentruy), des Francs-Comtois et des Alsaciens (Leblanc, capitaine de Génie à Montbéliard, Leconte, ingénieur civil à Montbéliard et Mende, capitaine de Génie à Belfort). Louis Agassiz (1807-1873) et Jules Thurmann sont déjà des membres de la SGF et ce dernier est nommé président de cette séance extraordinaire. Les autres membres de la SGF présents sont :

Boubée	Lardy	Puton
Braun	Leblanc	Renoir
Buckland	Mandelsloh (de)	Royer
Clément-Mullet	Morelli	Roemer
Gallienne	D'Omalius d'Hallot	Riepl
Gourieff (de)	Parandier	Saul
Jémot	Perrin	Verneuil (de)
Hoeninghaus	Pinteville (de)	

Les personnes étrangères à la SGF sont :

Althaus (baron d'), de Durrheim	Hugi, de Soleure
Ansted, de Cambridge	Ladame, de Neuchâtel
Bornèque, de Belle-Fontaine	Leblond, de Beaucourt
Cerf-Bonnis, de Montbéliard	Moser, de Montbéliard

Charpentier (de), de Bex	Mougeot fils, de Bruyères
Desor, de Neuchâtel	Nicolet, de La Chaux-de-Fonds
Dubois, de Boudry	Paravicini, de Lucelle
Duvernois, de Montbéliard	Parot, de Montbéliard
Durand, de Porrentruy	Pascal, de Montbéliard
Ebelmann, de Vesoul	Perty, de Berne
Fallot, de Montbéliard	Schimper, de Mulhouse
Flamand, de Montbéliard	Schroeder, de Soleure
Friche-Joset, de Porrentruy	Trouillat, de Porrentruy
Grenier, de Besançon	Weisser, de Porrentruy
Guyot	

Cette réunion est l'occasion d'apporter des présentations et discussions sur la géologie du Jura, la mise en place des blocs erratiques, la carte géologique, l'origine des plis et les morphologies associées. Lors de la première journée, parmi les communications, on peut noter :

Conjoncture sur les causes de la forme ellipsoïdale et de la fermeture d'un grand nombre de vallées dans le Jura par le commandant de Génie Lejeune.

Sur les blocs erratiques alpins, épars à de grandes distances des Alpes, par J.-A. Deluc.

La carte topographique et géologique des environs de Belfort, par Renoir.

En fin de journée, une excursion se déroule sur la colline du Banné au sud de Porrentruy où J. Thurmann peut présenter visuellement plusieurs ordres de soulèvements.

Parmi les communications du 6 septembre, notons aussi :

Sur l'influence de la nature des roches dans les formes orographiques du Jura neuchâtelois, par Nicolet.

Observations sur les glaciers par Louis Agassiz.

Le 7 septembre: excursion au Mont Terrible (aujourd'hui Mont Terri).

Le 8: de Porrentruy au Weissenstein, par Delémont, Bellerive et les cluses de Moutier.

Le 9: du Weissenstein à Bienne, par la Rœtifluh, le Balmberg et Soleure.

Le 10 : de Bienne à la Neuveville, par le lac et l'île Saint-Pierre.

Le 11 : de la Neuveville à Delémont par Chasseral, le val, Saint-Imier, Pierre-Perthuis, Bellelay et le Pichoux.

C'est à Delémont le 11 septembre que « la Société s'est séparée, afin que les membres qui désireraient se rendre pour le 12 au matin à la réunion des naturalistes suisses à Bâle, pussent y arriver à temps » (Société géologique de France, 1838, p. 380).

2. 3. Critiques des plis de soulèvement lors de la réunion extraordinaire à Porrentruy

Peu après la publication de son *Essai sur les soulèvements jurassiques du Porrentruy* en 1832, J. Thurmann a donc la possibilité de défendre ses propositions lors de cette réunion où il dirige une excursion dans les paysages qui l'ont inspiré. L'absence de roche plutonique dans le cœur des zones anticlinales ne fait l'objet d'aucun commentaire même si de telles roches sont considérées être le moteur des structures de ce secteur. De même, aucune remarque n'est formulée sur l'allongement des structures anticlinales qui marque si fortement les paysages du Jura plissé, en lui donnant des caractéristiques qui paraissent assez mal s'accorder avec des propositions voulant en faire des centres volcaniques.

L'absence de critiques face aux propositions d'intrusions peut éventuellement s'expliquer par la façon dont l'auteur a formulé sa proposition :

« L'hypothèse du soulèvement est en ce moment si largement admise, que ce n'est pas ici le lieu d'en discuter la valeur. Notre travail doit se borner à l'appliquer à la série, et à voir si les résultats théoriques cadrent avec les faits que nos montagnes présentent. D'autre part nous savons que dans les phénomènes plutoniques il y a surtout trois choses à considérer : le soulèvement pur et simple en lui-même ; l'épanchement ou dégagement de substances qui a pu l'accompagner ; enfin les altérations qui ont pu en résulter. [...] Cette combinaison, si compliquée dans les chaînes où ces trois circonstances se réunissent, paraît dans le Jura devoir se réduire entièrement à la première.

Aucune trace d'un épanchement intérieur ne s'y manifeste ; aucune altération due au contact des agents plutoniques ne paraît jusqu'à présent y avoir été observée, et le problème du soulèvement, dégagé entièrement de ces données si difficiles à mettre en équation, paraît y appartenir exclusivement au domaine des causes mécaniques, du moins quant à l'ensemble du résultat. Tout ce que nous avons à faire, se borne donc à supposer qu'une force agissante de bas en haut a été appliquée à la série de dépôts que nous avons étudiée, et à reconnaître ce qu'il en est advenu » (THURMANN 1832, p. 40).

Il faut tout de même reconnaître que *l'Essai sur les soulèvements* présente quelques commentaires sur de possibles manifestations ignées pouvant être mises en relation avec les soulèvements du Jura :

« Le Jura n'offre, il est vrai, aucunes traces d'épanchemens granitique, porphyrique, etc. ; les altérations dues aux agens plutoniques, y paraissent ou nulles, ou au moins très-peu importantes : par conséquent ces sortes d'épanchemens ne jouent dans le soulèvement jurassique aucun rôle assez considérable pour qu'il soit nécessaire de les prendre en considération dans l'examen des formes produites par ce soulèvement, examen qui est le principal objet de cette partie de notre essai. Cependant nous ne prétendons pas qu'il n'y ait eu aucune espèce de dégagement de substances dans le phénomène du soulèvement jurassique. Nous serions au contraire porté à admettre des éruptions d'eaux acides, analogues à celles dont M. Rozet a démontré, avec beaucoup de probabilité, l'existence à une époque beaucoup plus moderne, ou bien encore des dégagemens gazeux, semblables à ceux que plusieurs géologues distingués ont liés à l'existence des sources acidulées et que notamment M. Hoffmann a rattachés à des soulèvements tout à fait semblables à ceux qui nous occupent. » (THURMANN, 1832, p. 75).

Néanmoins, les critiques les plus pertinentes adressées à J. Thurmann furent certainement celles de M. Leblanc se rapportant aux relations existant entre morphologie structurale et érosion. Cet auteur fait remarquer que les larges espaces qui séparent les crêtes d'un même niveau affleurant

de part et d'autre d'un anticlinal sont parfois si importants et occupés par des zones d'éboulis qu'on se demande si cet écartement, qui ne paraît pas correspondre aux effets directs du soulèvement, ne pourrait pas plutôt résulter de l'érosion :

« M. Leblanc fait observer que quand on examine la coupe d'une chaîne jurassique, et qu'on cherche à replacer les différents massifs dans leur situation horizontale primitive, on est frappé de la grande portion qui manque dans les strates qui forment les crêtes, pour pouvoir opérer le rapprochement, et l'on se demande alors la cause de leur écartement si considérable. Le glissement latéral des massifs a bien pu, dit-il, y contribuer, mais il semble qu'il y ait là une autre cause très efficace de cet effet. [...] Si l'on réfléchit que cette forme n'est pas celle que devrait produire le soulèvement [...], on sera convaincu que la forme actuelle est due à la désagrégation par la gelée et à l'enlèvement par l'eau de marnes [...] qui aurait causé ainsi la chute d'une portion du crêt, et que l'éboulement est lui-même le produit de la désagrégation par la gelée. Les aiguilles encore en place qu'on voit souvent en avant du crêt, sortant du talus d'éboulement, sont comme des témoins laissés là pour attester le reculement du crêt. La forme des ruz sera due à la même cause agissant sur les fentes du flanquement. Il en serait de même de la configuration elliptique des cirques, qui aurait primitivement offert une déchirure terminée par un angle aigu. [...] » (Société géologique de France, 1838, p. 422).

Répondant donc à cette critique, J. Thurmann reconnaît l'importance des modifications morphologiques apportées par l'altération et l'érosion. Mais il estime qu'il est malheureusement difficile de comparer ces effets avec ceux liés aux intrusions, car dans les deux cas, on manque de repères pour distinguer l'importance des déformations associées à l'érosion de celles qui sont produites par le soulèvement. À cette époque, J. Thurmann est surtout sensible à l'approche géomorphologique (étendue et forme des boutonnières) alors qu'il a tendance à négliger les considérations et observations se rapportant à la déformation effective des roches. D'autres critiques sont adressées par B. Studer qui souligne que le Jura, n'est marqué par aucune

manifestation d'altération (dans le sens du métamorphisme) pouvant être en relation avec les effets d'un soulèvement issu des profondeurs.

Lors de la réunion de Porrentruy, B. Studer défend l'idée que le plissement du Jura n'est peut-être pas associé à des intrusions mais est en relation avec le plissement des Alpes par un effet de « refoulement », une proposition que H.-B. de Saussure avait déjà formulée à la fin de sa vie.

« M. Studer, s'occupant également de la cause première des soulèvements du Jura, pense que les agents de la commotion qui ont donné à ce système son relief principal, ne doivent pas être cherchés dans le Jura même, et que ce relief est dû au refoulement des terrains, causé par l'élargissement de la fente, suivant laquelle ont surgi les Alpes. Les motifs qui l'engagent à considérer le Jura comme une dépendance du grand accident des Alpes, et non pas comme un accident individuel portant tous les caractères éruptifs que l'on remarque dans d'autres montagnes sont le peu d'altération des roches (le métamorphisme) dans le Jura et la hauteur croissante des chaînes vers les Alpes; enfin la surface considérable que devraient occuper les couches soulevées du Jura, si elles étaient rétablies sur un plan horizontal, le fait pencher pour du refoulement. » (Société géologique de France, 1838, p. 424).

Au cours de ces cinq jours d'excursion, si le but était de mettre l'accent sur l'observation des « plis de soulèvement » par J. Thurmann (mais aussi des phénomènes glaciaires mis en évidence par L. Agassiz), les observations et les arguments mirent en évidence l'importance de la théorie du refoulement qui veut que l'élévation du Jura soit liée à un déplacement d'est en ouest et à la poussée des Alpes :

« M. Thurmann reconnaît, quant à l'idée du refoulement appliquée au Jura, qu'il a déjà fait plusieurs observations sans pouvoir arrêter son opinion. Il pense que la forme des soulèvements par application immédiate d'un agent soulevant ne serait pas tout-à-fait la même que celle des soulèvements par refoulement; [...] De plus il lui paraît, qu'en cette question, il faut surtout envisager l'ensemble de tout le système du Jura,

la disposition relative des chaînes et leur dépendance réciproque. En considérant cet ensemble, il lui paraît en effet qu'il porte plutôt le caractère d'un plexus de refoulement que celui d'un réseau de directions linéaires de soulèvement. » (Société géologique de France, 1838, p. 421)

C'est donc au cours de cette excursion que J. Thurmann, B. Studer et le capitaine Leblanc font progressivement émerger l'idée de refoulement des roches du Jura sous l'action de la poussée des roches alpines.

Avec le recul, on constate que cette séance extraordinaire de la Société géologique de France qui, sur le plan structural, avait certainement été conçue pour rendre compte des différents aspects d'une chaîne de soulèvement, voulait certainement aussi rendre hommage à J. Thurmann qui, par son approche, était parvenu à donner une image cohérente de son développement structural et morphologique. La réunion marque en fait l'émergence des critiques qui conduiront à l'abandon des hypothèses de soulèvement que J. Thurmann avait placées à la base de l'évolution structurale de cette chaîne. Après cette réunion, son travail d'analyse morphologique, sa cartographie et son ambition de réaliser sur cette chaîne une analyse exemplaire restent des valeurs reconnues, mais elles demandent d'être envisagées sur la base d'hypothèses totalement différentes. L'idée de soulèvement se trouve discréditée, même si son influence restera encore palpable pendant un certain temps. Elle est assez rapidement remplacée par l'hypothèse des poussées latérales issues des Alpes. Après Albert Heim (1849-1937) et August Buxtorf (1877-1969), le Jura sera définitivement considéré comme un élément structural de l'orogénie alpine. (HEIM, 1878; BUXTORF, 1916a)

2. 4. De nouveaux arguments pour les plis de soulèvement

Les *Observations géologiques sur le Jura soleurois* d'Amans Gressly, pierre angulaire de la notion de faciès, sont également une contribution structurale de premier ordre, bien que cet aspect de l'œuvre soit souvent ignoré (GRESSLY, 1837-1841).

Élaborée après les travaux de J. Thurmann, elle les évoque sans cesse.

Cette monographie sur le Jura soleurois de A. Gressly présente principalement ses idées sur la structure du Jura oriental. Dans l'ensemble, il soutient les propositions de J. Thurmann, tout en s'en éloignant parfois. Pour A. Gressly, le plissement de la chaîne a pris naissance à partir d'une zone centrale, marquée par un très vaste cratère de soulèvement centré dans la région de Waldenburg (entre Aarau au sud et Liestal au nord). C'est de ce tronçon commun que divergent en direction de l'ouest les chaînes majeures du Blauenberg, du Mont Terri, du Passwang, du Hauenstein et du Weissenstein. D'autres chaînes mineures, dont les Lägern, se sont développées en direction de l'est. Basée sur une appréciation topographique très approximative, cette audacieuse vision a été rapidement contestée par J. Thurmann. Les très nombreux profils accompagnant le travail de A. Gressly témoignent des difficultés que la théorie des soulèvements de J. Thurmann entraîne dans les régions du Jura où l'érosion a mis au jour les niveaux profonds de la chaîne. Ainsi A. Gressly présente quatre croquis de la géologie de la cluse d'Oensingen-Balsthal présentée sous des angles différents où il a observé, sur une même verticale, la répétition des mêmes assises du Dogger. Pour lui, c'est certainement une façon de souligner les interrogations posées à cette époque, par cette étrange structure. Il faut également souligner que les paysages très contrastés qui marquent le passage du Jura tabulaire au Jura plissé ne sont ni illustrés ni commentés par A. Gressly. Situés à la limite des zones centrales que l'auteur a analysées, il n'a cependant pas pu les ignorer. Cette absence est peut-être liée au fait qu'il n'était pas parvenu à proposer des solutions raisonnables expliquant ces particularités. Ce sont Albrecht Müller (1819-1890) puis surtout Max Mühlberg (1873-1947) qui combleront cette lacune plus tard.

Rappelons que, d'autre part, les dépôts sidérolitiques sont pour A. Gressly l'un des éléments révélateurs de la structuration du Jura. Ces dépôts sont rapportés au Crétacé inférieur; leur origine, qui n'est pas marine, évoque, pour lui, des conditions analogues à celles rencontrées, en surface, près des sources thermales, avec corrosion des roches encaissantes. Remplissant des fentes, ces

dépôts possèdent à ses yeux des analogies avec les filons plutoniques. Leur fréquente association avec des ruptures ou des failles longitudinales et leur présence répétée dans le voisinage de ce qu'on considère être alors des centres de soulèvement, le conduit à conclure :

« qu'il existe une connexion intime entre la formation des terrains sidérolitiques et les phénomènes de soulèvement. [...] La formation plutonique ou semiplutonique du terrain du minerai de fer en grain est l'effet mais non pas la cause du soulèvement de nos chaînes jurassiques » (GRESSLY, 1837-1841, p. 286).

Gressly est d'avis que les chaînes jurassiques se sont soulevées à plusieurs reprises au cours des temps géologiques. En s'appuyant sur la localisation des faunes marines et sur la répartition des faciès sédimentaires, il situe que les premières manifestations de soulèvement se seraient produites dès le Jurassique. C'est entre la fin du Jurassique et le début des temps crétacés qu'il place un second soulèvement du Jura ; celui-ci aurait donné ses principaux traits aux reliefs qu'il a étudiés jusque dans leurs prolongements : Blauen, Passwang, Hauenstein et Weissenstein. Après les temps crétacés, le Jura aurait connu un développement rapide en direction du sud-ouest, contrairement au secteur septentrional qui serait resté plus stable. Il justifie cette interprétation par l'absence de sédiments crétacés dans le nord-est de la chaîne. L'ultime soulèvement du Jura serait postérieur aux derniers dépôts tertiaires. Ce grand bouleversement, très souvent considéré comme le seul ayant affecté la chaîne est condamné par A. Gressly en fonction des arguments suivants :

- a) Absence de terrains crétacés dans le nord-est du Jura.
- b) Absence de terrains tertiaires récents dans plusieurs vallées et sur la plupart des plateaux du Jura.
- c) Discordance stratigraphique entre terrains jurassiques et crétacés (une idée développée et entretenue par les recherches d'Auguste de Montmollin (1808-1898) à Neuchâtel) puis par la discordance présente sous les formations tertiaires.

Pour A. Gressly, ces faits impliquent une structuration précoce de la chaîne, façonnée par plusieurs

périodes d'activité ignée. Cette proposition aurait pu le conduire à douter que le plissement fût provoqué par des actions associées aux roches éruptives ; mais sur ce point, son expérience était trop limitée.

À son retour d'Amérique en 1852 où il a été en contact avec les frères Rodgers², Édouard Desor (1811-1882)³ note que dans le Jura

« les voûtes régulières sont toujours une exception ; elles sont le plus souvent inclinées, au point même qu'une couche repliée au sommet de la voûte peut présenter des deux côtés de son axe une inclinaison égale et dirigée dans le même sens. Ce type de structure est observé dans les [monts] Alleghany⁴ où elles sont interprétées comme étant liées à des pressions latérales, agissant sur les couches pour former le plissement, [plutôt] que des forces soulevantes verticales. » (DESOR, 1853 p. 4).

E. Desor remarque que dans le Jura toutes les pentes abruptes sont tournées vers les Alpes, alors que les pentes douces sont en direction de la France, dans la direction de laquelle les chaînes parallèles s'abaissent insensiblement pour se terminer par des collines. Ses observations attentives permettent de reconnaître que les chevauchements sont avant tout dirigés vers l'extérieur de la chaîne, et que peu de renversements des structures se font en direction de l'intérieur de l'arc (rétro-chevauchements). Ces deux types de déformations longitudinales sont intimement associés aux plis dont elles partagent l'origine. Cette relation ne s'est imposée qu'assez tardivement mais sera bien présentée sur les profils du Congrès géologique international de 1894 à Zürich.

L'accumulation de tous ces arguments provenant de toutes ces recherches, fait que J. Thurmann finira par se ranger à l'idée de refoulement. En 1838, alors encore indécis, il reconnaît déjà que les dispositions générales de l'ensemble des structures du Jura paraissent mieux s'accorder avec

² Il s'agit des géologues américains Henry Darwin Rogers (1808-1866) et William Barton Rogers (1804-1882).

³ Voir éléments biographiques in SCHAEER (1998).

⁴ Les monts Allegheny sont une partie de la vaste chaîne des Appalaches dans l'est de l'Amérique du Nord. Elle s'étend sur plus de 600 km et fait environ 150 km de large. Spruce Knob est son point le plus élevé, culminant à 1482 m.

des poussées latérales qu'aux effets d'un réseau linéaire de soulèvement. Il est même disposé à apporter quelques preuves sur ce sujet mais, pour se faire, il manque encore de certitudes.

En 1853, lors de la réunion de la Société helvétique des sciences naturelles à Porrentruy, qui s'est tenue les 2, 3 et 4 août, il précise sa position dans son *Résumé des lois orographiques générales du système des Monts-Jura pour servir de prodrome à son nouvel ouvrage sur ce sujet*. Il y note :

« Je me bornerai donc maintenant à ajouter, que l'ensemble des lois exposées conduit à éliminer toute action soulevante [sic] appliquée verticalement, soit selon des lignes, soit marchant le long de celles-ci dans un sens déterminé ; et qu'au contraire, tous les faits que j'ai eu l'honneur de vous soumettre s'interprètent en tous points, par l'hypothèse d'une action latérale, procédant du côté suisse vers le côté français sur des massifs faillés et avec concours de grands agents d'ablation. »
(THURMANN 1853, p. 292).

C'est alors que J. Thurmann introduit une division de la chaîne qui sera souvent reprise. Elle comporte trois zones de caractère différent :

- a) La Haute-Chaîne de position interne avec des reliefs vigoureux.
- b) Une zone centrale plus érodée.
- c) Une zone de plateaux qui se termine par des falaises bordant la Bresse.

Cette division est associée à une suite de ruptures longitudinales, parallèles à la courbure de la chaîne, recoupant souvent des zones plissées, alors que d'autres ruptures, moins nombreuses, recoupent transversalement le découpage longitudinal sans porter des traces de soulèvement relatif. L'ensemble des plis forme un plexus (réseau cordé) à mailles très allongées. De nombreuses chaînes présentent des changements de direction pouvant atteindre 20 à 30°. Dans les zones de dislocations faillées, les derniers accidents cassants sont principalement placés sur le versant français des plis. Ceux-ci présentent ainsi une dissymétrie marquée avec un flanc redressé ou couché du côté français alors que pour l'autre flanc, côté molassique, la pente est peu inclinée. Sur 120 chaînes

anticlinales, 90 présentent le regard français. La convexité des chaînes courbes, de même que les zones de grandes ablations montrent la même tendance dissymétrique que celle des plis. D'une manière générale, le rejet des failles augmente de la Haute-Chaîne en direction des zones externes (Bresse), de même que l'importance de l'ablation. Sur les 162 chaînes qu'il a reconnues dans le Jura, 30 sont de premier ordre, 80 du second, 40 du troisième et enfin seulement 12 de quatrième ordre.

J. Thurmann abandonne ainsi son hypothèse du soulèvement. Ce renoncement à une théorie qu'il avait imaginée et formulée et qui lui avait apporté la reconnaissance de ses pairs est un geste qui honore le savant. La théorie du soulèvement par action verticale est remplacée par les effets de forces agissant horizontalement et latéralement. Ce renversement de mécanisme est justifié par un ensemble d'arguments provenant de l'intégration de données de terrain en apportant plus d'unité et de cohérence dans les différents éléments structuraux de la chaîne.

2. 5. Essai de synthèse et questions pour le futur

Un an auparavant, en août 1852, J. Thurmann publie *Esquisses orographiques de la chaîne du Jura*, un ouvrage comprenant une carte géologique du Jura central et oriental, à l'échelle 1 : 200 000. Elle couvre la région située à l'ouest de Neuchâtel et s'étend en direction de l'est jusqu'aux Lägern, au nord de Zürich. Ce remarquable document est accompagné d'une planche de quinze coupes à l'échelle 1 : 50 000 (pour les longueurs et les hauteurs) (fig. 32 & 33) approximativement orientées nord-sud, apportant une vision vaguement tridimensionnelle d'un large secteur du Jura s'étendant du bord du Bassin molassique jusqu'à la frontière nord de la Suisse. Cette contribution comporte l'énumération et la localisation des principales chaînes, des cluses, des cirques, des grandes combes, des ruz et des principaux plateaux. Au niveau de ce dernier point, J. Thurmann fait remarquer que la région des Franches Montagnes, à laquelle on donne fréquemment le qualificatif de « plateau », ne se range pas dans cette dernière

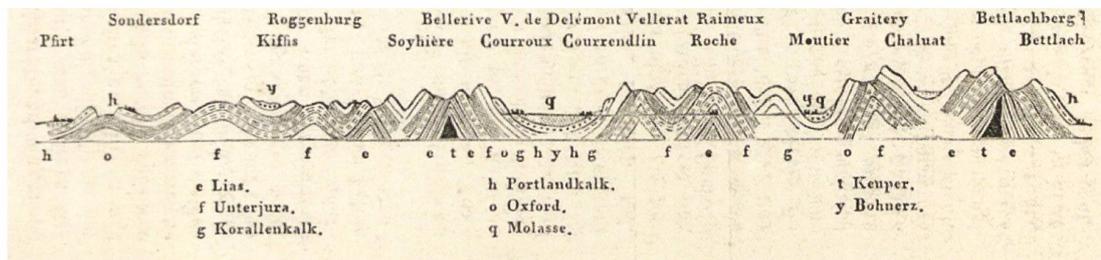


Fig. 34 : Profil géologique jurassien entre Pfirt (Ferrette, actuellement dans le Territoire de Belfort) et Bettlach (Bâche, dans le canton de Soleure) extrait de *Geologie der Schweiz* par B. STUDER en 1853, p. 317.

catégorie. Une troisième planche représente *douze aspects géologiques destinés à donner une idée de la manière dont se présentent en perspective les formes orographiques du Jura oriental*.

En cette même année de 1853, B. Studer publie dans le volume 2 de sa *Geologie der Schweiz* (STUDER, 1853) ses vues sur le Jura qui sont illustrées par de nombreux profils régionaux (fig. 34) dont certains traversent une bonne partie de la chaîne et s'étendent jusqu'aux limites septentrionales du Jura en France voisine. Dessinés avec une exagération de l'échelle des hauteurs, ces illustrations présentent des suites d'anticlinaux symétriques et droits, montrant une nette tendance à des plis en chevrons dans les secteurs de raccourcissement majeurs, alors que des formes plus arrondies sont dominantes dans les secteurs les plus externes de la chaîne.

Chez J. Thurmann, le dessin cherche à souligner les aspects morphologiques des structures, où les crêtes et les combes se développent à partir de plis aux formes arrondies pouvant parfois se rapprocher de plis coiffés; d'une manière générale, on ne perçoit qu'une faible tendance à un renversement des structures pour souligner le regard français.

J. Thurmann estimait que sa contribution *Esquisses orographiques de la chaîne du Jura* de 1852 représentait un premier pas qui devait être poursuivi dans le but de disposer sur l'ensemble du Jura d'une information de qualité qui lui paraissait être nécessaire pour saisir et résoudre, par la cartographie, l'ensemble des problèmes touchant à l'histoire géologique de la chaîne; ce vœu ne fut jamais réalisé. Il y fut partiellement répondu par la publication de séries de cartes géologiques qui, en

France, entre 1880 et 1895, couvrent la partie du Jura français par onze feuilles de la carte géologique détaillée de la France au 1:80 000⁵. Du côté Suisse, neuf feuilles de l'Atlas géologique de la Suisse au 1:100 000 publiées entre 1867 et 1879 couvrent la partie interne de la chaîne avec des secondes éditions de feuilles qui paraissent entre 1876 et 1913. Ces importantes contributions, avec des échelles et des conceptions de base quelque peu différentes, ne sont ainsi pas parvenues à répondre totalement au souhait de J. Thurmann qui espérait disposer d'une carte géologique homogène assurant la couverture de l'ensemble de la chaîne.

On se souvient que dès 1838, J. Thurmann reconnaît que les calcaires, un matériel d'apparence rigide, se présentent souvent dans les régions tectonisées comme le Jura, sous la forme de plis, parfois avec de très petits rayons de courbure, qui en fait s'accordent assez mal avec les propriétés mécaniques ordinaires reconnues à ce matériel. Il relève qu'

« une force quelconque appliquée à un calcaire compact ne saurait le ployer de manière à lui faire conserver la courbure déterminée par la flexion. [...] Il est donc forcé d'admettre qu'au moment de la formation des ploiements des roches de la série jurassique celles-ci se trouvaient encore dans un état de mollesse particulier, pouvant être associé à une sorte de consistance pâteuse. Dès lors, les stries, de glissement, les étirements de toute espèce, qui se rencontrent partout dans les calcaires jurassiques, devraient naturellement être la suite de cet

⁵ Voir note de bas de page n° 4, page 35.

état de choses. (Société géologique de France, 1838, p. 427).

Il réfute les remarques de L. Agassiz qui avait souligné la fréquence de niveaux spathiques séparant les couches où les deux faces portent des stries longitudinales et parallèles, semblables à celles produites par les aspérités de deux surfaces glissant sous la pression l'une de l'autre. Cet auteur va jusqu'à proposer même que le frottement engendré par le plissement de roches calcaires solidifiées aurait été suffisant pour entraîner leur fusion avec la formation de niveaux spathiques marqués par des stries. Dans son œuvre posthume inachevée en 1857, *Essai d'orographie jurassique*, dans l'espoir de mieux saisir l'évolution de la chaîne, J. Thurmann cherche à intégrer l'ensemble des différentes traces de la déformation qu'il a observées dans les calcaires (diaclasses, plans de failles et de glissement, stylolites, galets déformés, etc.). Malheureusement, toute sa démarche est influencée par sa conviction que l'enregistrement de ces déformations, se sont produites alors que les roches calcaires du Jura étaient encore marquées par « *un état de mollesse* », héritées des fluides qu'elles avaient incorporés au moment de leur sédimentation. Dans cette perspective, il affirme que :

« 1° Les caractères observés dans les roches soulevées repoussent formellement l'état lithomorphique de ces roches, au moment du soulèvement. 2° Ils repoussent un état péломorphique très-fluide, ou tel que nous l'avons vu se manifester dans les accidents plastiques antérieurs à l'inclinaison des couches.

3° Ils indiquent un état péломorphique, suffisamment voisin de la consolidation, pour offrir (en général) une résistance notable aux réductions de volume, mais pouvant percevoir encore des empreintes plastiques dans certains cas du maximum d'application des forces soulevantes. » (THURMANN, 1857, p. 149).

Partant de l'idée que les déformations des roches du Jura se sont produites alors qu'elles n'étaient pas encore totalement consolidées, J. Thurmann s'engage dans une voie difficile devant lui permettre de rendre compte que l'ensemble des déformations qu'il a observées se sont produites alors que le tissu sédimentaire participant à l'édification de la chaîne est encore dans un état pâteux. Pour intégrer l'ensemble des observations dont il dispose sur cette question, il introduit une nomenclature inédite, particulièrement lourde, qui va encore porter préjudice à ses explications ; de plus, celles-ci se trouvent également desservies par la proposition bien douteuse que les pics stylolites, qu'il nomme *thlasmés*, représentent des cicatrices de l'étirement de la matière calcaire.

On ne peut que regretter la tournure prise par cette tentative de J. Thurmann. Par l'analyse des différentes traces de déformation laissées par les mouvements de la matière à l'intérieur de masses plastiques et sur des surfaces de rupture de ces matériaux, il pensait qu'il lui serait possible de mieux saisir l'évolution dynamique de la chaîne au cours de sa déformation. C'était une tentative précoce de procéder à l'analyse de la déformation par les moyens de la microtectonique où il cherche à intégrer les observations intéressantes, comme celles de l'orientation privilégiée des diaclasses, la fréquence de l'orientation des pics stylolitiques et les traces de mouvements révélées par les stries. Faute de résultats, cette tentative sera perdue, puis oubliée, comme les tentatives visant à l'estimation de la porosité de fracture. Il faudra attendre plusieurs décennies avant que de nouvelles conditions favorables permettent l'éclosion de cette démarche. Il faudra abandonner l'idée que la déformation des roches du Jura s'est produite alors que celles-ci n'avaient pas encore acquis leur rigidité, comme le pensait J. Thurmann ; il faudra aussi renoncer à l'idée que les stylolites sont le résultat d'étirements et que les galets impressionnés sont la trace de la pénétration d'un objet rigide dans une masse plastique.

Chapitre 3

Les premières études locales

Après la contribution de H.-B. de Saussure, l'étude géologique du Jura va essentiellement progresser par des études régionales s'attachant à des problèmes locaux, avec l'espoir d'apporter des solutions propices à l'exploration d'autres parties de la chaîne.

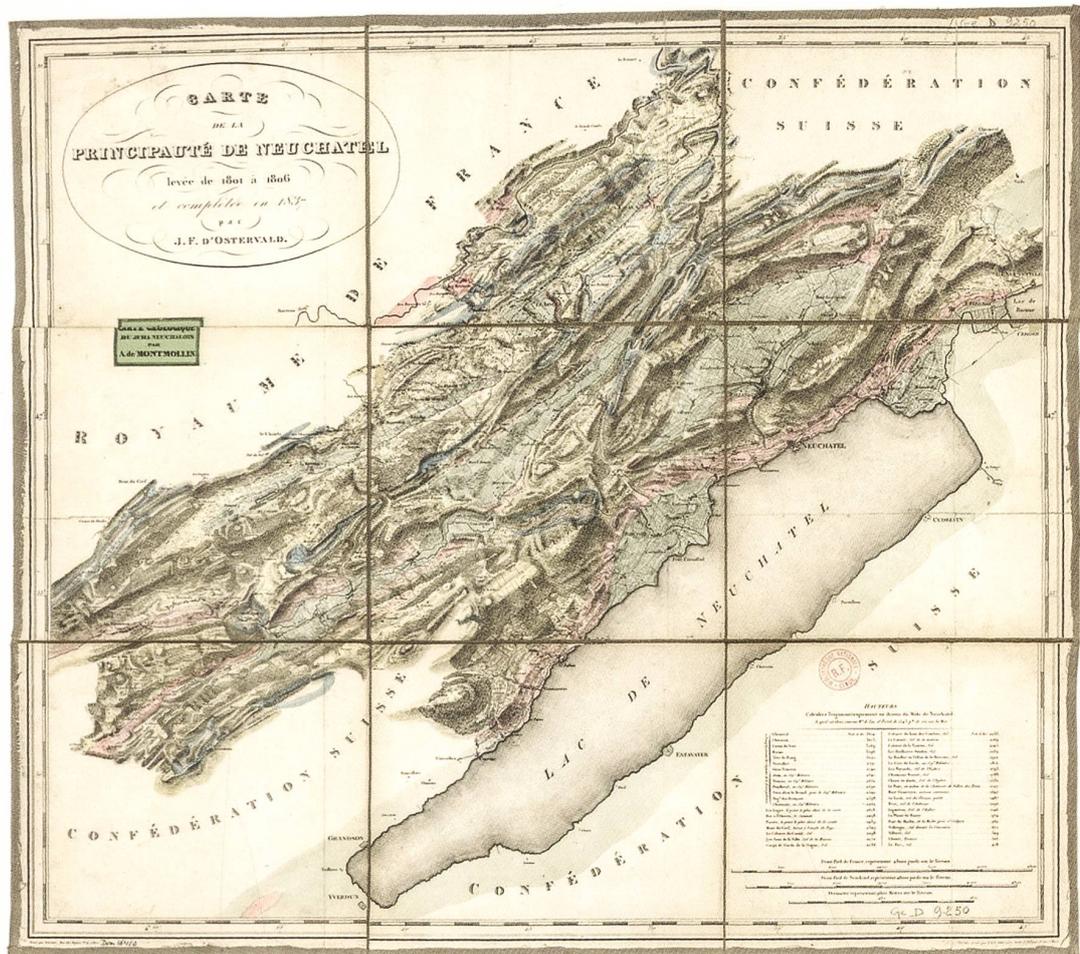
3. 1. L'école neuchâteloise : Louis Agassiz (1807-1873) et ses successeurs

Le Jura neuchâtelois, avec sa structure bien réglée, la belle continuité de ses anticlinaux, leur érosion parfois modérée (Chaumont) ou plus profonde (Mont Racine, Pouillerel), présente des caractéristiques qui auraient dû attirer le regard des pionniers de la géologie neuchâteloise. Cependant, à cette époque héroïque de la recherche géologique locale, les interrogations sont essentiellement focalisées sur la paléontologie, la stratigraphie, le glaciaire, et ne donnent que peu d'attention à la morphologie et aux structures. De plus, comme ces deux dernières disciplines sont alors guidées et même prisonnières des remarquables schématisations introduites par Jules Thurmann dans son *Essai sur les soulèvements*, il était nécessaire de dépasser cette vision pour aller au-delà de cette approche qui offre bien l'avantage de grouper des considérations structurales, morphologiques et lithostratigraphiques, mais qui néglige par contre l'évolution des formes du terrain en fonction du temps.

Les recherches géologiques entreprises par L. Agassiz et son équipe présentent une nette continuité avec les investigations de Léopold von Buch ; elles sont cependant plus nettement orientées vers les aspects biologiques des sciences que ne l'étaient celles du savant berlinois. Ce changement est en liaison directe avec le cheminement pris par L. Agassiz dans ses études en Allemagne et par leur prolongement lors de son passage chez Georges Cuvier (1769-1832) à Paris.

Parmi les chercheurs entourant L. Agassiz, Auguste de Montmollin est le plus neuchâtelois de ceux-ci et le premier à se faire connaître par des publications de qualité. Il s'intéresse à la géologie dès 1825, nettement avant l'établissement de L. Agassiz à Neuchâtel en 1832. En s'appuyant sur les écrits de Louis Bourguet et de L. von Buch, que son père possède, il entreprend très tôt des investigations dans les environs de Neuchâtel et de Valangin, lieu de la propriété familiale. Devenu étudiant à l'École polytechnique de Paris où, à cette époque, quelques places étaient réservées à des étudiants suisses, il entre en contact avec le Français Alexandre Brongniart (1770-1847), titulaire de la chaire de minéralogie au Muséum, qui lui permet de consulter ses collections et le met en relation avec d'autres géologues parisiens. Avec ces aides, il est assez rapidement convaincu que les marnes qui se placent sous la Pierre jaune de Neuchâtel où il a récolté de nombreux fossiles (les marnes bleues d'Hauterive), présentent des assemblages faunistiques du Crétacé et non du Jurassique, comme on l'admettait ordinairement. L. Agassiz souligne que « *dans la détermination des terrains [leur âge...] les caractères minéralogiques sont peu importants comparés à ceux fournis par l'étude des fossiles [...]* » (AGASSIZ, 1835, p. 25). C'est lors de la seconde réunion de la Société géologique des Monts du Jura, à Besançon que J. Thurmann propose « *de donner, au moins provisoirement à cette formation remarquable [les formations de la Pierre Jaune de Neuchâtel et des marnes associées], le nom de terrain Néocomien (Neocomensis, c'est-à-dire de Neufchâtel, comme on dit Portlandien, Oxfordien, etc.)* » (THURMANN, 1836b p. 209).

Dans le Jura central, la carte géologique, établie par A. de Montmollin en 1839 à partir d'une bonne connaissance de la lithologie locale, dans des paysages marqués le plus souvent par une morphologie conforme avec d'assez bonnes conditions d'affleurement, permet à l'auteur de présenter deux profils qui, pour l'époque, donnent une vision structurale très satisfaisante du Jura



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Fig. 35 : Carte géologique tirée de *Note explicative pour la carte géologique de la principauté de Neuchâtel* extraite d'A. DE MONTMOLLIN en 1839 à partir de la carte de la Principauté de Neuchâtel levée de 1801 à 1806 par J. F. D'Ostervald.

neuchâtelois (fig. 35 & 36, DE MONTMOLLIN, 1839). L'exagération des hauteurs dans la représentation topographique de profils renforce l'idée que les soulèvements proposés par J. Thurmann ont également contribué à la déformation des roches de cette partie du Jura. Cela donne à ce document une allure qui s'accorde parfaitement avec l'idée que les structures du Jura sont associées à des intrusions. On retiendra également que A. de Montmollin envisage que les roches du Jura neuchâtelois sont marquées par deux faibles discordances, l'une située entre les roches

du Jurassique et celles du Crétacé, l'autre entre les roches du Crétacé et les dépôts molassiques.

L'Essai sur la constitution géologique de la vallée de La Chaux-de-Fonds du pharmacien chaux-de-fonnier Alphonse Célestin Nicolet (1803-1871)¹ en 1839, situe l'engouement que connaissent alors les recherches géologiques en pays neuchâtelois (fig. 37). Par rapport aux autres travaux régionaux

¹ Voir éléments biographiques in SCHAEER (1998) et in SCHLUP (2001).

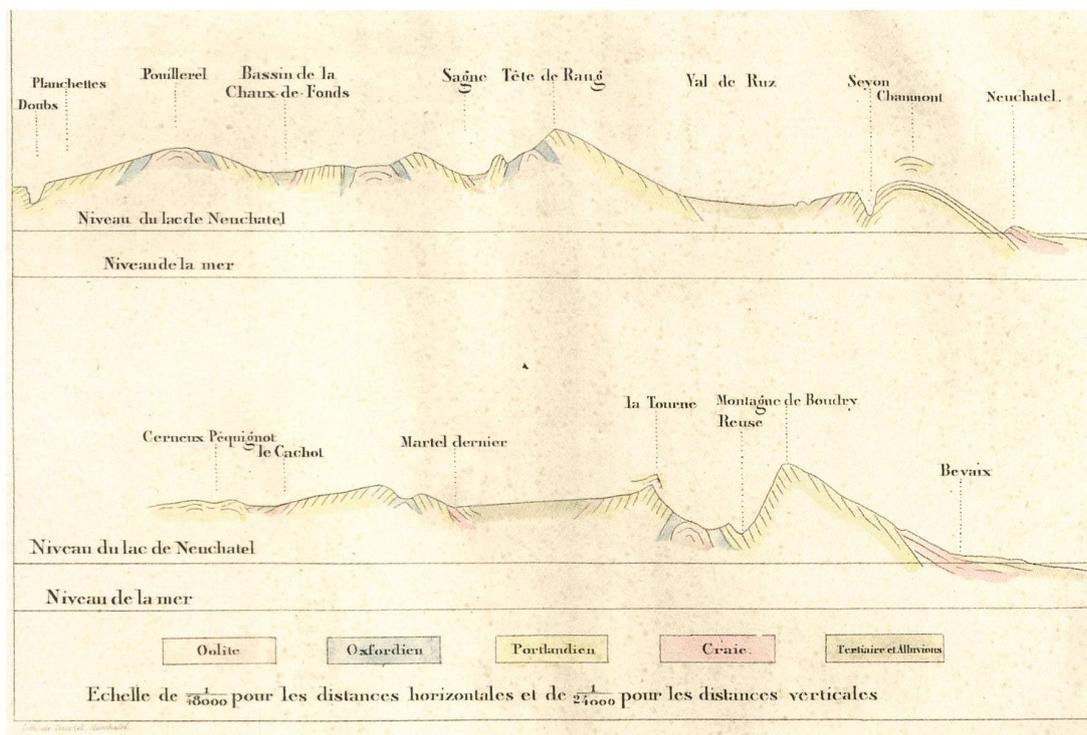


Fig. 36 : Deux profils géologiques à travers le Jura depuis Neuchâtel jusqu'au Doubs et de Bevaix jusqu'à Cerneux-Péquignot extraits de *Note explicative pour la carte géologique de la principauté de Neuchâtel* d'A. DE MONTMOLLIN en 1839

de cette époque, il fut le premier à montrer que les assises calcaires situées sous les marnes de Hauterive (le Valanginien), doivent encore être considérées comme appartenant au Crétacé et non au Jurassique, comme on l'admettait alors.

Comme déjà évoqué dans le chapitre précédent, Amanz Gressly introduisit avec éclat la notion de faciès sédimentaire dans son œuvre *Observations géologiques sur le Jura soleurois*, (GRESSLY, 1837-1841). Cette contribution majeure des sciences de la Terre a été saluée par des commentaires relativement récents: César Eugène Wegmann (1896-1982) en 1962 et Timothy A. Cross & Peter W. Homewood (né en 1945) en 1997. Cet éclat touchant l'approche purement sédimentaire a, dans une certaine mesure, détourné l'attention de l'importance de cette monographie sur le plan de la géologie régionale et tout particulièrement structurale. Cette situation n'est pas totalement étrangère à la qualité de nombreux croquis locaux d'où n'émerge pas une synthèse claire

de l'évolution régionale. Les structures reconnues sur le terrain et leur représentation par des croquis s'accordent souvent assez mal aux propositions de soulèvement inspirées des travaux de J. Thurmann que l'auteur s'efforce d'appliquer.

La monographie d'Auguste Jaccard (1833-1895) consacrée à la description géologique du Jura vaudois et neuchâtelois (publiée dans le cadre de la Commission géologique suisse) (JACCARD, 1869) ne comporte encore qu'une vingtaine de pages sur plus de trois cent pour évoquer les relations entre la structure et leurs modifications sous les effets de l'érosion. Dans de telles contributions, le cadre général fait encore appel à la schématisation de J. Thurmann en y apportant de légères retouches pour tenir compte des spécificités lithologiques locales. A. Jaccard, qui est avant tout descriptif, pose tout de même parfaitement le cadre des futures recherches. Il révèle que les

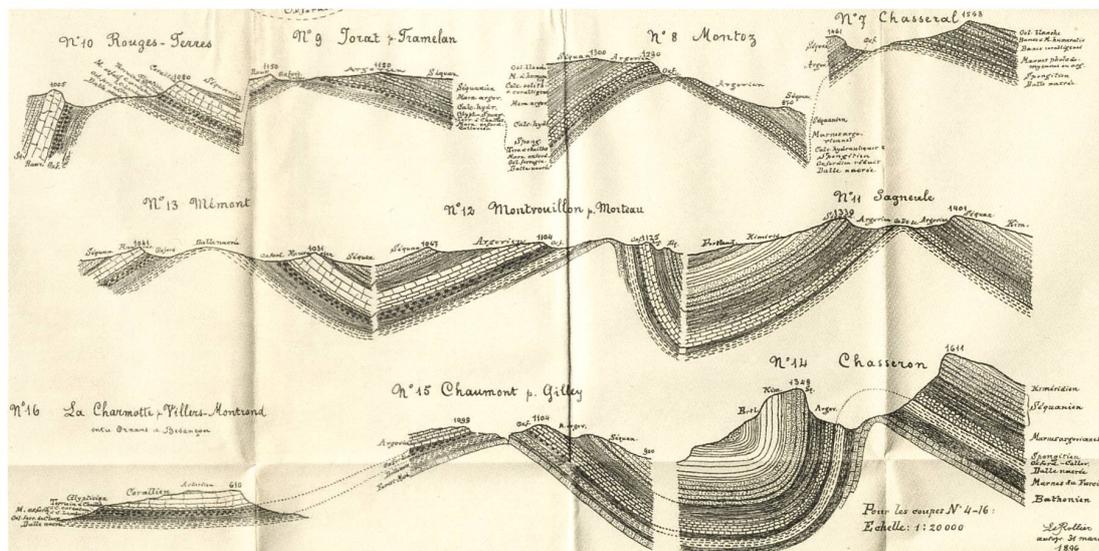


Fig. 38 : Suite de profils géologiques extraite de *Coup d'œil sur les formes et les relations orographiques que déterminent les faciès du Malm dans le Jura* de L. ROLLIER en 1896.

assises du Jurassique supérieur forment souvent « des voûtes très élargies, passant à l'état de plateaux peu élevés au-dessus des vallons latéraux » (JACCARD, 1869). Dans les accidents orographiques de second ordre avec le dégagement des marnes argoviennes et l'apparition des voûtes du Dogger, la dissymétrie structurale lui permet de distinguer les chaînes à regard sud (Chasseron, Suchet, Dent de Vaulion) de celles à regard nord (La Tourne, Le Cervelet, le Mont des Cerfs). Il relève que ces structures se terminent parfois par des cirques présentant en général une convexité tournée du côté de l'ouest. C'est « l'un des phénomènes orographiques des plus grandioses et des plus pittoresques du Jura » (JACCARD, 1869, p. 262). Ces accidents morphologiques, de même que les ruz et les cluses (pas toujours perpendiculaires aux plis), sont le reflet de l'érosion active agissant, pendant fort longtemps, sur des structures plissées. En accord avec Charles Lyell (1797-1875), il déclare :

« Tout porte à croire, en effet, que les grands cataclysmes invoqués aux premiers temps de la science géologique sont plus ou moins imaginaires, et que l'action lente des forces de la nature a eu la plus grande part dans le façonnement de notre sol » (JACCARD, 1869, p. 256).

Par une suite de profils géologiques (fig. 38) provenant tant des zones internes que des parties médianes et des zones externes du Jura, Louis Rollier (1859-1931) cherche à montrer la diversité morphologique rencontrée dans cette chaîne abusivement qualifiée de monotone (ROLLIER, 1896). Les particularités locales observées sont mises en relation avec les variations latérales de faciès et de puissance que présentent les assises du Malm. Néanmoins, aucune faille ne semble indiquée sur ces profils.

Au début du xx^e siècle, trois monographies régionales présentent la géologie des environs du Val de Travers. Celles de Erwin Rickenbach (1900-1968) en 1925, de Charles Mühlethaler (1895-1952) en 1931 ainsi que celle de Charles Émile Thiébaud (1910-1995) en 1937. Elles soulignent le caractère conforme de la morphologie régionale; les grandes vallées comme les reliefs dominants correspondent respectivement aux synclinaux et anticlinaux majeurs. Ces auteurs font également part de l'importance de la dénudation qui a localement dégagé les puissantes assises calcaires du Malm en mettant ainsi à nu les marnes argoviennes où l'érosion peut progresser plus rapidement pour atteindre le cœur du

Dogger. C. Mühlethaler et C. E. Thiébaud proposent que cette évolution morphologique, qui s'est développée après le plissement, a été marquée par un premier stade d'érosion ayant conduit à la formation d'une pénéplaine. Celle-ci aurait été ultérieurement déformée par une reprise de l'activité tectonique au cours du Pliocène, comme l'a proposé l'allemand Eduard Brückner en 1902, en désaccord avec l'autrichien Fritz Machatschek en 1905. Tant E. Rickenbach que C. Mühlethaler tentent de dégager les principales causes ayant conduit à la formation du remarquable cirque de Saint-Sulpice. Son origine leur paraît liée à des causes structurales, aux effets de la dissolution des eaux souterraines et au travail de l'érosion glaciaire. En complément de ces études, il paraît nécessaire de mentionner le travail de Jules Favre publié antérieurement (FAVRE, 1911). Cet auteur avait souligné qu'après un premier plissement du Jura, postérieur au Tortonien, les forces érosives et les agents de corrosion avaient attaqué le relief nouvellement formé et l'avaient atténué. Les anticlinaux avaient alors perdu jusqu'à 500 m de leur enveloppe sédimentaire. Actuellement, ils se présentent sans pentes abruptes, avec des aplatis à peine plus élevés que le fond des vallées synclinales. Des rejets de failles de plus 300 m ont été complètement nivelés par l'érosion. Dans les sédiments peu résistants des craies lacustres tortoniennes, cette érosion tardive qui paraît liée à l'abaissement du niveau de base du Doubs, la principale rivière de la région, a entamé l'ancienne vallée extrêmement plate dont les restes sont situés 100 m au-dessus de la vallée actuelle du Locle. Cette évolution morphologique relativement récente est-elle liée au soulèvement de la pénéplaine jurassienne, comme J. Favre le pense, ou faut-il la mettre en relation avec les effets de l'érosion karstique régionale dans un régime tectonique relativement stable ?

3. 2. Dans le Jura bâlois

C'est dans les environs de Bâle, face au Fossé rhénan et à la Forêt-Noire, qu'ont été élaborées les premières études régionales importantes. Peter Merian fut le premier acteur d'une série de personnalités de premier plan issues de la cité rhénane qui, au cours

des ans, apporteront des contributions majeures à la compréhension de la géologie du Jura. Homme politique influent, naturaliste distingué, P. Merian était directeur du musée d'histoire naturelle local. Dans le Jura, il fut l'auteur des premières cartes géologiques détaillées (MERIAN, 1821 et 1829). Ses principaux intérêts géologiques sont tournés vers la stratigraphie où il s'efforce d'affiner les corrélations entre les assises de la région bâloise et surtout celles reconnues en Allemagne, sans oublier les données françaises et celles de la Grande-Bretagne. Il ne néglige pas pour autant l'approche structurale régionale. Dans cette perspective, il est l'auteur de la première traversée à travers la chaîne, qu'il a établie entre Bâle et le Bassin molassique, au niveau d'Aarwangen (MERIAN, 1829). Dans ce document encore sommaire (fig. 39), il reconnaît qu'au-delà de Bâle en direction du sud-est, le paysage est d'abord dominé par les assises du Jurassique et du Tertiaire en position subhorizontale recoupées par des failles méridiennes qui se poursuivent jusque dans la Forêt-Noire. Plus au sud, au-delà de ce Jura tabulaire, on passe brusquement dans une zone plus élevée, d'orientation ouest-est, structuralement très perturbée, où se rencontrent, entre des crêtes de Dogger, des assises du Muschelkalk et du Keuper, parfois verticales, qui en côtoient d'autres orientées qui plongent avec des pendages de 45° ou inférieurs, au sud-est. Au-delà, avant de parvenir dans le Bassin molassique, il signale, au niveau de la cluse d'Oensingen, la présence de deux importantes voûtes calcaires de Jurassique supérieur placées au-dessus d'un noyau de Dogger.

Les profils de la région du Fricktal dessinés par Albrecht Rengger (1764-1834) constituent une autre figuration précoce des importants charriages rencontrés dans cette partie du Jura oriental (fig. 40, RENGGER, 1829). Dessinés avant l'établissement de l'échelle stratigraphique du Jura, ils présentent une suite de couches globalement inclinées au sud, avec de nombreuses répétitions (couches du Muschelkalk et du Keuper) qui viennent buter contre les séries subhorizontales du Jura tabulaire. Le dessin très géométrique des profils donne une image assez éloignée des phénomènes naturels ; comme cette contribution n'a été accompagnée d'aucun commentaire de nature structurale, elle n'a eu que peu d'influence.

Après P. Merian, Albrecht Müller poursuit l'exploration du Jura bâlois et des régions avoisinantes.

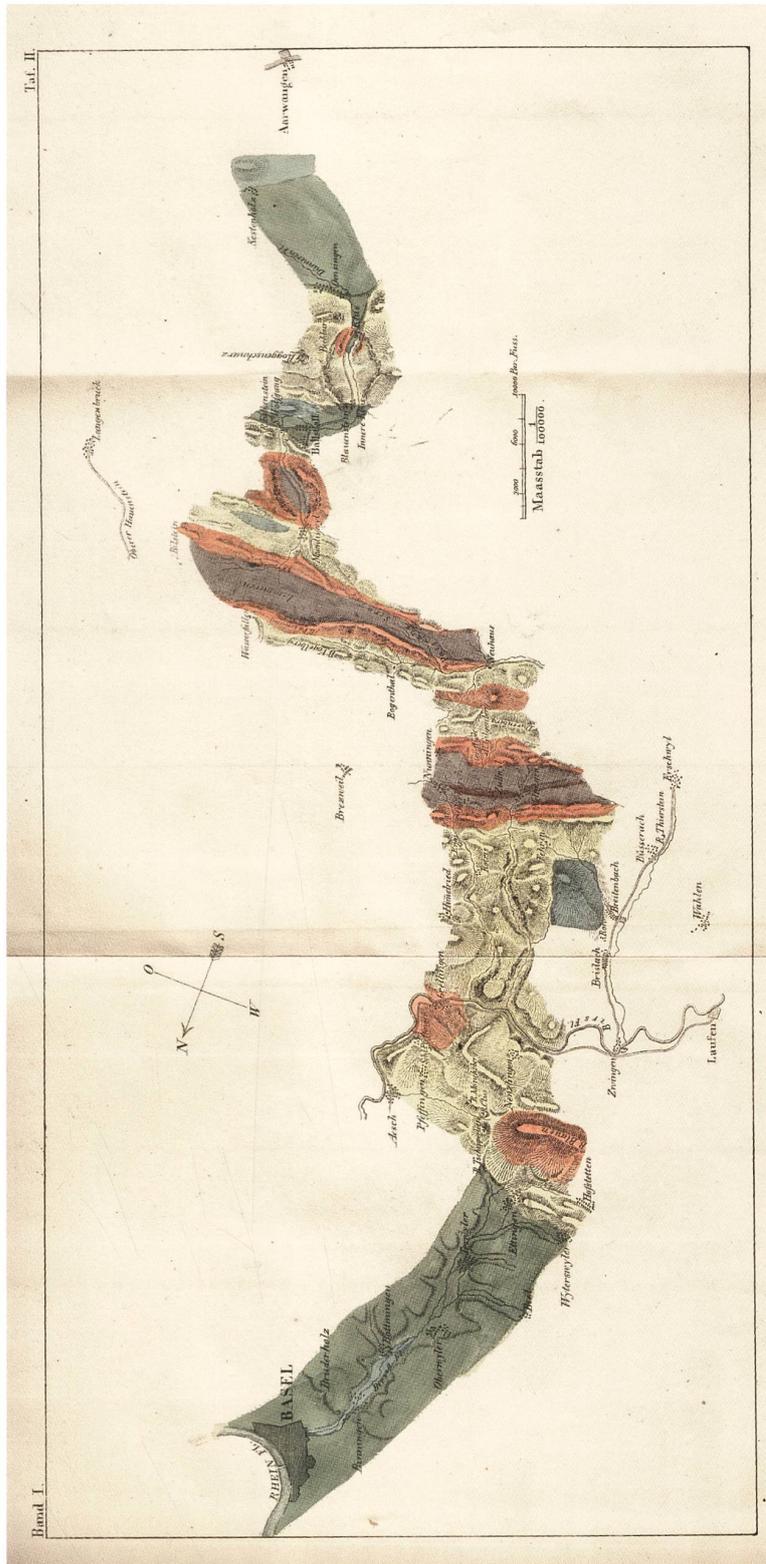


Fig. 39: Traversée géologique Bâle – Aarwangen. Extrait de Geognostischer Durchschnitt durch das Jura-Gebirge von Basel bis Kestenholz bei Aarwangen, mit Bemerkungen über den Schichtenbau des Jura im Allgemeinen de Peter MERIAN, en 1829.

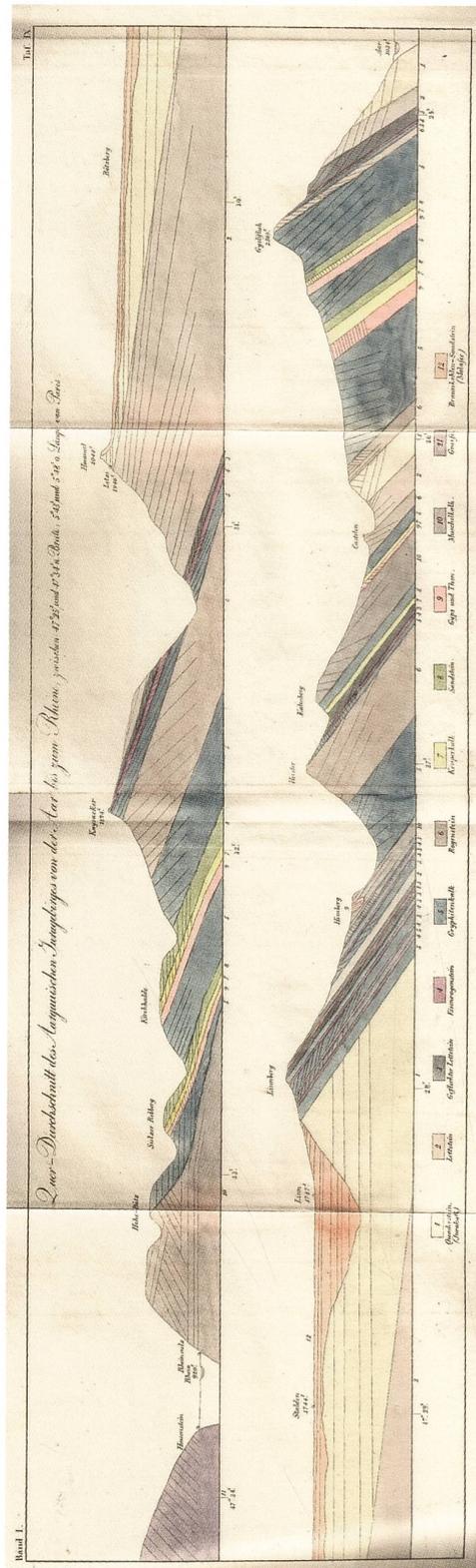


Fig. 40 : Carte extraite de Ueber den Umfang der Jura-Formation, ihre Verbreitung in den Alpen und ihr Verhältniss zum Tertiär-Gebirge, als Einleitung einer Beschreibung des Aargauischen Jura-Gebirges, sammt einem Quer-Durchschnitte des letztern d'Albrecht RENGGER en 1829.

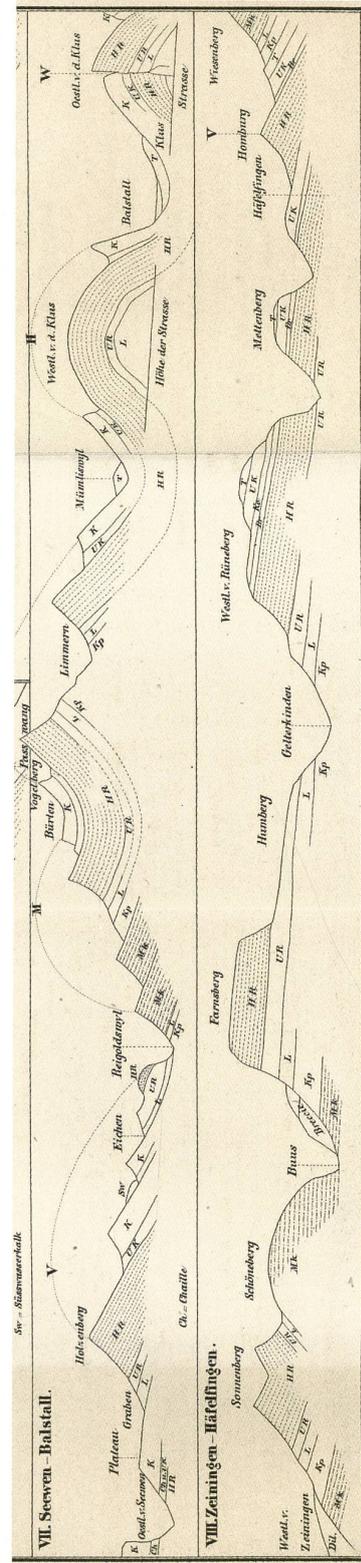


Fig. 41 : Différentes coupes géologiques extraites de Geognostische Skizze des Kantons Basel und der angrenzenden Gebiete du 1^{er} volume des Matériaux pour la Carte géologique de la Suisse, par A. MÜLLER en 1862.

Bien que son activité scientifique se soit poursuivie à l'époque où la recherche géologique dans cette partie du Jura est encore fortement influencée par la théorie du soulèvement de J. Thurmann, il est un observateur analytique qui se montre plus soucieux des faits observés que des spéculations. Il est l'auteur du premier volume des *Matériaux de la Carte géologique de la Suisse* (MÜLLER, 1862) qui accompagne et commente la carte du Jura bâlois à 1:50 000 publiée par la Commission géologique de la Suisse nouvellement créée. Dans ce texte, il reconnaît que les chevauchements du Jura plissé, formés par d'importantes séries d'assises plissées, après avoir été transportées au nord, reposent maintenant sur le Jura tabulaire. Il envisage que les déformations qui ont conduit à ces structures soient le résultat d'impulsions répétées qui se sont produites principalement durant les temps tertiaires, alors que les plus récentes pourraient même avoir été actives durant le Quaternaire. Il attribue cette disposition plutôt aux effets de manifestations plutoniques qu'à l'influence de poussées latérales venant des Alpes. Les illustrations qui accompagnent ses travaux présentent de nombreux cas de structures renversées recouvrant parfois des formations tertiaires subhorizontales. Dans ces cas, les traits du dessin paraissent réduits à leur minimum, peut-être pour ne pas donner trop de poids à une situation qui lui paraît encore bien étrange. Par contre, le dessin des structures anticlinales de la cluse de Balsthal (fig. 41), situées plus au sud, avant d'atteindre le Bassin molassique, est adapté des croquis de A. Gressly et est marqué à nouveau par un trait assuré.

3. 3. Dans le Jura franc-comtois : Alexandre Vézian (1821-1903)

Durant le XIX^e siècle, les synthèses géologiques régionales et autres études du Jura franc-comtois sont principalement orientées vers la stratigraphie et la paléontologie: Jules Marcou (1824-1898) en 1846, Charles Contejean (1824-1907)² en 1859 et Frère Ogérien (1825-1869)

² Pour une vision plus globale de l'œuvre de C. Contejean, lire: MALVESY, Thierry. 2010. *Charles Louis Contejean, soldat de la Science*, Besançon: Éditions du Sékoya.

en 1865-67. En revanche, celles donnant la priorité aux problèmes structuraux sont plus rares. Dans la première note de cette veine, Just Pidancet (1823-1871) souligne que les reliefs du Jura franc-comtois ne sont pas uniquement liés au phénomène de plissement mis à la mode par la théorie des soulèvements, mais que des failles, dont il souligne les orientations, y jouent un rôle non négligeable tout particulièrement dans les secteurs dominant le Bassin bressan (PIDANCET, 1848).

Du 9 au 15 septembre 1860, a lieu la réunion extraordinaire de la Société géologique de France à Besançon (Société géologique de France, 1860). Elle porte essentiellement sur la stratigraphie, tout particulièrement celle associée aux assises du Lias et du Jurassique supérieur local. Elle y examine la diversité des faunes afin d'y tester les possibilités d'y reconnaître des unités permettant l'établissement de corrélations précises avec les divisions établies dans d'autres régions comme la Grande-Bretagne. En fin de réunion cependant, Charles Lory (1823-1889) fait remarquer que le secteur de Besançon est marqué par des accidents structuraux compliqués et imprévus qui modifient les rapports ordinaires des successions de strates; la combinaison de failles et l'action de pressions latérales conduisant à des apparences trompeuses, évoquant en petit les structures semblables à celles que rencontrent les géologues travaillant dans les Alpes.

L'étude d'Alexandre Vézian sur *Le Jura Franc-Comtois, études géologiques I et II*, publiée sur deux années (1872 et 1873) aux bulletins de la Société d'émulation du Doubs, est une contribution de caractère ample où l'auteur place son analyse régionale dans le cadre de la géologie générale de la Terre. En s'appuyant sur les travaux de J. Thurmann, principalement examinés au travers de la publication de A. Gressly de 1837-1841, il juge que « toutes les forces qui interviennent dans la géologie dynamique sont au moment où elles se produisent, verticales » (VÉZIAN, 1873 p. 432). Sur un plan général, son approche n'est certes pas innovante, mais elle a l'avantage de placer un repère sur l'approche structurale pratiquée par l'un des pionniers de la géologie du Jura franc-comtois, permettant de situer les connaissances de l'époque et d'apprécier l'ampleur des développements ultérieurs.

Au moment de la publication de son ouvrage, A. Vézian est professeur à l'Université de Besançon. Il y fait état de sa vaste culture des sciences de la Terre par des citations sur les travaux de Nicolas Steno (1638-1686), James Hall (1761-1832), John Tyndall (1820-1893), Charles Lyell ou L. von Buch en dehors de références sur les travaux français de C. Lory et de Léonce Élie de Beaumont (1798-1874). Il sait que J. Thurmann a abandonné en 1856 sa théorie des soulèvements au profit de l'idée des refoulements; il en reprend cependant l'élément de base pour aborder les déformations rencontrées dans le Jura franc-comtois, en faisant appel à A. Gressly, dont les idées lui paraissent plus nettes que celles émises par J. Thurmann. Ce dernier lui paraît être plus préoccupé des effets que des causes de la structuration. Comme d'autres géologues de son temps, A. Vézian soutient l'idée que les reliefs sont liés à l'action de forces agissant de bas en haut. Ainsi, le bassin sédimentaire dans lequel les roches du Jura se sont formées, bien qu'étant une dépendance du Bassin parisien, s'en distingue vers la fin du Crétacé par une tendance à s'élever. Durant les temps tertiaires, c'est la Bresse et le Bassin molassique qui deviennent des zones de subsidence propices à une abondante sédimentation détritique. Pour A. Vézian, c'est à la fin de cette période que se produit la structuration du Jura. Elle est avant tout marquée par d'importantes failles verticales qui recoupent la totalité d'une croûte épaisse de 20 km environ; en surface, ces accidents présentent une grande extension latérale; pour celle de Montfaucon, près de Besançon, elle est de l'ordre de 70 km. L'origine de ses structures est liée au refroidissement de la croûte:

«Elles ont découpé le Jura en fragments prismatiques qui ont été placés les uns contre les autres. [...] Les diverses pièces de cette mosaïque ont été dérangées sous l'impulsion des forces extérieures; elles ont glissé les unes contre les autres de manière à faire saillie à la surface du sol. Ces saillies n'ont été qu'imparfaitement affectées par les agents d'érosion, de sorte que la mosaïque est encore à l'état brut [...] Cette disposition, due à l'entrecroisement des failles, s'observe principalement dans la zone occidentale du Jura. Mais dans la zone orientale, les failles sont moins nombreuses et bien moins prononcées [...]» (VÉZIAN, 1873, p. 373).

Dans la zone au sud de Besançon, l'agencement de ces éléments, avec leur couverture subhorizontale, est mis en valeur par la publication de cartes dont Marcel Bertrand (1847-1907) est l'auteur: cartes géologiques régionales au 1:80 000 de Gray, Besançon et Lons-le Saunier (BERTRAND, 1880; 1882; 1884b). On y distingue une suite de compartiments qui, au bord de la Bresse, présentent du Trias. En direction de la Haute-Chaîne, les assises affleurantes deviennent de plus en plus jeunes et finissent par présenter les assises du Jurassique supérieur. Si A. Vézian accorde une grande attention aux failles et à leur disposition dans le paysage, il reconnaît que les soulèvements en voûte constituent les principaux éléments orographiques de la chaîne, tout en restant discret sur les dispositions présentées par ces éléments structuraux dans cette partie du Jura. Par contre, il accorde une attention soutenue à leur formation qui, à ses yeux, reste dépendante des roches ignées, bien qu'il ne lui soit pas possible de faire état de leur présence. C'est pourtant à ces types de roches qu'il rapporte la formation des soulèvements en voûte.

«À partir du moment où la matière éruptive atteint le sommet de la fissure, [...] elle exerce une forte pression contre les strates, les soulève et les courbe sans leur imprimer aucune rupture, du moins d'une manière directe. Lorsque cette rupture existe, elle affecte, non les strates inférieures situées dans le voisinage de la matière éruptive, mais les strates superficielles qui en sont plus éloignées.» (VÉZIAN, 1873, p. 446)

Au niveau des relations entre failles et soulèvements en voûte, il précise:

«Les failles et les soulèvements en voûte ont une origine commune. Ils procèdent également de fentes ou de fissures existant préalablement à travers l'écorce terrestre. Ces deux manifestations ont une certaine communauté d'origine» (VÉZIAN, 1873, p. 463).

Les soulèvements sont considérés comme postérieurs aux failles dont l'âge est rapporté à la fin du Miocène, les forces les ayant formés diminuant des Alpes en direction du Jura. Très abondants et bien marqués dans le Jura oriental, ces soulèvements sont absents dans la Haute-Saône, mais encore faiblement marqués près de Besançon. Ils plissent

les formations molassiques de la fin du Miocène et sont donc postérieurs à cette époque.

A. Vézian fait également part de ses réflexions sur le plissement des assises calcaires présentes dans les soulèvements en voûte. Il remarque que, bien que les strates soient formées de calcaires rigides, leur ploïement est facilité par l'alternance de niveaux calcaires et marneux où l'eau favorise les glissements entre des strates qui n'adhèrent plus ensemble. Les assises elles-mêmes sont également rendues plus souples par la présence de l'eau qui occupe la fine porosité de ces roches calcaires et par les fortes pressions liées à l'enfouissement. Lorsque les roches calcaires ont atteint leurs limites d'élasticité, elles se déchirent et, par-là, facilitent les mouvements de fragments indépendants formés par étirement, ce qui donne à l'ensemble une pseudo-plasticité. A. Vézian fait également part d'expériences montrant que les calcaires, qui paraissent si rigides, possèdent une certaine capacité de flexion qui s'accroît avec les effets de la pression et de périodes prolongées durant lesquelles ils sont exposés aux forces de déformation. Dans ce contexte, il cite les observations de J. Tyndall rendant compte de la plasticité de la glace des glaciers qui illustre l'écoulement d'un solide par « *les actions moléculaires qui interviennent avec d'autant plus d'efficacité que les forces qui les sollicitent opèrent avec plus de lenteur* » (VÉZIAN, 1873, p. 379).

Pour A. Vézian, les propositions de refoulement de H.-B. de Saussure, celles de J. Thurmann proposant une action latérale agissant de la Suisse vers la France sur des massifs faillés, pas plus que les arguments de Bernhard Studer évoquant l'existence d'une force latérale immense, ne le conduisent à abandonner l'idée que le plissement du Jura dépend de forces agissant de bas en haut. Pour lui, le massif du Mont-Blanc est également un soulèvement en voûte qui a été formé par les mêmes actions dynamiques que celles qui furent actives dans le Jura. La partie centrale du massif du Mont-Blanc, formée exclusivement par des terrains cristallins, atteint à elle seule une largeur de plus de 20 km soulignant ainsi la grande disproportion existant entre l'importance du soulèvement en voûte du massif du Mont-Blanc par rapport aux modestes soulèvements en voûte du Jura. Une autre différence, entre les soulèvements

alpins et les jurassiens, tient au fait que dans les Alpes les roches ignées se sont élevées nettement plus haut que la surface du sol alors que dans le Jura, elles sont restées cachées en profondeur.

Il précise :

« Quant à nous, nous ne saurions admettre que les soulèvements en voûte du Jura soit la conséquence d'une poussée latérale venue des Alpes. On ne s'explique pas comment cette impulsion aurait pu se faire sentir jusque dans les environs de Besançon, où l'on observe des soulèvements en voûte très bien dessinés. On ne s'explique pas non plus que cette impulsion ait pu se propager jusque sur ce point, après deux interruptions importantes, l'une correspondant à la plaine helvétique, et l'autre comprise entre le Haut-Jura et Besançon, c'est à dire dans une zone où les soulèvements en voûte sont rares et mal dessinés. Et si la possibilité d'un effort aussi considérable est admise, on ne comprend pas comment il a donné lieu à des accidents aussi peu considérables que les soulèvements en voûte. On comprendrait plutôt que le soulèvement du massif alpin eût pour conséquence celui du massif jurassien tout entier. Le rayon qui dessine la courbe d'un soulèvement en voûte est, en définitive, très court et on ne peut penser que la courbure qui affecte les strates persiste jusqu'à une grande profondeur. Or si la cause qui a recourbé ces strates avait son point de départ dans le massif alpin, elle aurait agi sur toute l'épaisseur de la croûte du globe, et les soulèvements en voûte attendraient de plus grandes proportions. Supposer, pour répondre à cette objection, que la poussée latérale ne s'est exercée que sur la partie superficielle de l'écorce terrestre, sur la zone sédimentaire, par exemple, qui aurait glissé sur la zone sous-jacente nullement intéressée au phénomène, c'est compliquer de plus en plus le problème sans le résoudre. » (VÉZIAN, 1873, p. 437)

La proposition d'A. Vézian envisageant le découpage de la série sédimentaire du Jura de son socle et son glissement pour former les plis de la chaîne, est assez étonnante; même si elle est formulée à titre d'hypothèse paraissant peu crédible et s'appuyant sur peu d'arguments sérieux, elle n'a, semble-t-il, jamais été reprise par la suite,

ni même signalée après que les propositions de August Buxtorf sur le même sujet eurent reçu un accueil généralisé.

Par la suite, dès que M. Bertrand fait état de ses premiers travaux scientifiques de cartographie dans le Jura, il mentionne la présence de failles subhorizontales qu'il a observées dans les paysages proches de la Bresse (BERTRAND, 1881). L'étude *Failles courbes dans le Jura et bassins d'affaissements* (BERTRAND, 1884a), fait l'objet d'un développement où l'auteur souligne que dans les phénomènes orographiques, les plis et les failles, bien que représentant des phénomènes distincts, ne sont pas des manifestations indépendantes mais sont deux manifestations complémentaires

destinées à faciliter l'agencement de masses déformées ayant été mises en mouvement. Dans le Jura, l'étude géométrique des failles conduit à les mettre en relation avec le phénomène de plissement. Ainsi, dans la région de Besançon et de Salins, il montre l'existence de failles presque horizontales où des terrains anciens ont été poussés et charriés sur des terrains plus récents. Bien que les déplacements soient modestes par rapport à ceux observés dans l'est du Jura, c'est la première fois que ce phénomène est présenté dans le secteur du Jura français en remettant en cause les commentaires de A. Vézian qui estimait que les failles sont des cassures verticales recoupant toute la croûte.

Chapitre 4

Premiers tunnels ferroviaires et cartes géologiques

4. 1. Percement des premiers grands tunnels dans le Jura

Les travaux entrepris durant la fin du XVIII^e siècle, à la recherche de sel et de charbon, ont été favorables aux investigations géologiques locales, tout particulièrement dans les régions de la bordure de la Bresse et dans celles du Jura tabulaire à l'est de Bâle. Les travaux destinés à l'établissement des lignes de chemins de fer ont conduit à des résultats d'une tout autre portée, tout particulièrement lorsqu'il a fallu percer d'importants tunnels.

Un peu avant le milieu du XIX^e siècle, plusieurs projets de voies ferrées envisagent de traverser le Jura par des tunnels relativement importants. Les travaux de planification et la réalisation de ces travaux ont contribué à une accélération des connaissances locales et régionales par des documents précis qui, assez souvent, se sont trouvés confrontés, en cours de réalisation, avec des problèmes inattendus.

Ces développements furent particulièrement importants pour préciser et confirmer les particularités du style tectonique du Jura oriental avec ses charriages, chevauchements et écaillages. La réalisation des travaux de percement a par la suite permis d'établir de multiples comparaisons avec d'autres secteurs de la chaîne et de mieux cerner la circulation des eaux en profondeur, et ainsi apporter les premières données sur le régime géothermique de ces régions. Entre 1911 et 1915, le percement des derniers grands tunnels traversant la chaîne du Jura, ceux situés entre Granges et Moutier, a permis de proposer une théorie nouvelle et révolutionnaire pour expliquer le plissement du Jura et ses particularités découlant d'un décollement généralisé de la couverture au niveau des assises évaporitiques du Trias (voir Tectonique, chapitre 6.5.).

Le contexte dans lequel ces travaux furent entrepris a nécessité d'établir des documents géologiques dans lesquels la rigueur géométrique

dépassait souvent les pratiques ordinaires des géologues ; les levés de terrain sont alors établis sur des cartes topographiques précises, spécialement conçues pour ces travaux ; les ingénieurs exigent des profils rigoureux où les échelles des longueurs et des hauteurs doivent être équivalentes pour obtenir une rapide et bonne estimation des volumes. Ces documents conduisent souvent à une transformation de la représentation des structures. Dans cette évolution, le dessin des anticlinaux se modifie en perdant souvent leur allure symétrique et sinusoïdale ; les zones fortement déformées révèlent de fréquentes discontinuités des strates qui sont également observées dans les affleurements dégagés de la couverture des sols et autres dépôts quaternaires, mettant en évidence l'association de structures cassantes et ductiles. Les problèmes liés aux circulations des eaux deviennent rapidement une préoccupation majeure qu'il faut craindre et surtout dominer pour assurer l'avancement des travaux.

Les coupes théoriques établies avant l'engagement des travaux sont assez rarement confirmées lors du percement. Dans bien des cas, plusieurs interprétations sont proposées avant que ne s'engagent les travaux ; certaines se voient plus ou moins modifiées au cours des travaux, et dans certains cas, des visions divergentes persistent au-delà du percement. Assez souvent, les travaux préparatoires contribuent à une remise en question des causes ayant conduit au développement des structures ; les propositions de soulèvement perdent de leur crédibilité et sont remplacées par l'idée que le plissement de la chaîne est lié à l'action de contraintes latérales ; l'observation attentive des structures rencontrées dans ces travaux et dans leur environnement impose finalement l'idée du décollement de la couverture au niveau des évaporites triasiques. Du point de vue hydrogéologique, les découvertes occasionnées par le percement des tunnels ferroviaires sont explicitées dans Hydrogéologie, chapitre 3.

4. 1. 1. Une belle réussite géologique : les tunnels des Loges et du Mont Sagne (Jura neuchâtelois) en 1860

Dans le but de relier la région de l'horlogerie neuchâteloise située dans le Jura central à l'intérieur de la chaîne, on songe relativement tôt à établir une relation ferroviaire permettant de désenclaver les villes de La Chaux-de-Fonds et du Locle, en les reliant au réseau ferroviaire suisse qui se développe essentiellement au niveau du plateau molassique. Cette intégration ne peut se faire qu'en franchissant plusieurs chaînes anticlinales de la Haute-Chaîne qui culminent entre 1200 et 1400 m. La proposition qui rallie les suffrages vise à assurer cette connexion par le percement de deux tunnels : celui du Mont Sagne au nord, long de 1593 m et celui des Loges au sud, long de 3256 m. Ce dernier traverse la Haute-Chaîne au niveau du nœud structural de la Vue des Alpes où convergent plusieurs anticlinaux. *L'Étude géologique du Jura neuchâtelois* de E. Desor et A. Gressly, qui présente les travaux de reconnaissance entrepris par A. Gressly et la synthèse de ses études, est accompagnée par une nouvelle carte géologique au 1:25 000 établie sur un support topographique nouveau à courbe de niveau (DESOR & GRESSLY, 1859. Voir *Tectonique*, chapitre 1, fig. 24 & 25, page 95). Les profils géologiques détaillés au 1:2000 établis au cours de ces travaux sont joints à ce document, alors qu'une planche au 1:7500 compare le résultat de la prédiction des structures avec les données reconnues lors du percement, montrant la remarquable qualité de cette même prédiction qui est presque parfaite, sauf au centre de l'anticlinal des Loges où les formations du Lias prennent une allure moins régulière, moins symétrique que celle qui était prévue. Cette situation souligne l'excellent travail du géologue A. Gressly; elle est également liée à la qualité des affleurements proches de l'ouvrage et au fait que le percement a été effectué à un niveau structural relativement élevé, bien au-dessus du niveau de décollement situé dans les séries triasiques. Des études ultérieures de Hans Schardt (1858-1931) ont également montré que, dans cet anticlinal, les légers rétrécissements de certains niveaux marneux situés au passage Dogger-Malm pouvaient être en relation avec la trace affaiblie d'un chevauchement qui affecte, plus à l'ouest, le flanc nord de cette

structure (SCHARDT, 1902 & 1903a). Les prévisions concernant le tunnel traversant la structure du Mont Sagne sont pratiquement identiques à celles qui sont reconnues lors du percement. Sur le plan des eaux souterraines, l'espoir de rencontrer des sources dans la partie nord du tunnel des Loges, afin de répondre au manque chronique d'eau potable dont souffre la commune de La Chaux-de-Fonds, ne s'est pas réalisé. Seules de petites sources situées près du portail sud de ce tunnel peuvent être captées pour combler les besoins des modestes villages du Val de Ruz. Les importants enseignements structuraux apportés par le percement des tunnels du Jura oriental sont illustrés par la communication de Friedrich Mühlberg (1840-1915)¹ à laquelle il est largement fait appel dans les lignes qui suivent (MÜHLBERG, 1889a).

4. 1. 2. Incertitudes structurales et hydrologiques : premier tunnel du Hauenstein

Les deux autres premiers grands tunnels du Jura, celui du Hauenstein (1857) et celui du Bözberg (1875) situés dans le Jura oriental, sont destinés à assurer la traversée de la Suisse par le rail, de façon directe pour le premier, et en assurant la liaison Zurich – Bâle pour le second.

Pour l'époque, ces percements représentent d'importantes performances de génie civil. Sur le plan géologique, on constate que les travaux préparatoires contribuent, surtout au Bözberg, à modifier totalement les premières propositions des structures qui seraient rencontrées, en imposant l'idée de chevauchements qui sera confirmée et encore améliorée lors du percement. Après ces ouvrages, l'idée d'un important chevauchement du Jura plissé sur les séries tertiaires du Jura tabulaire s'impose définitivement, de même que les structures écaillées du Muschelkalk au niveau du cœur des anticlinaux.

Le percement du premier tunnel du Hauenstein², long de 2495 m, à deux voies, situé au nord de la

¹ Voir éléments biographiques in *Dictionnaire historique de la Suisse*.

² La désignation de: «*premier tunnel du Hauenstein*» tient au fait qu'un second tunnel, désigné comme «*Tunnel de base du Hauenstein*» est percé dans la même région, à une altitude inférieure, et mis en service dès 1916.

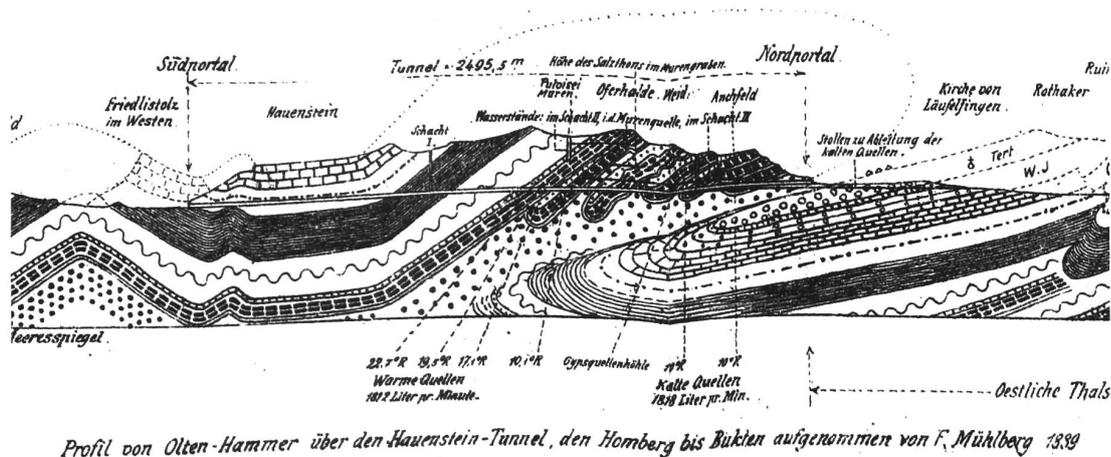


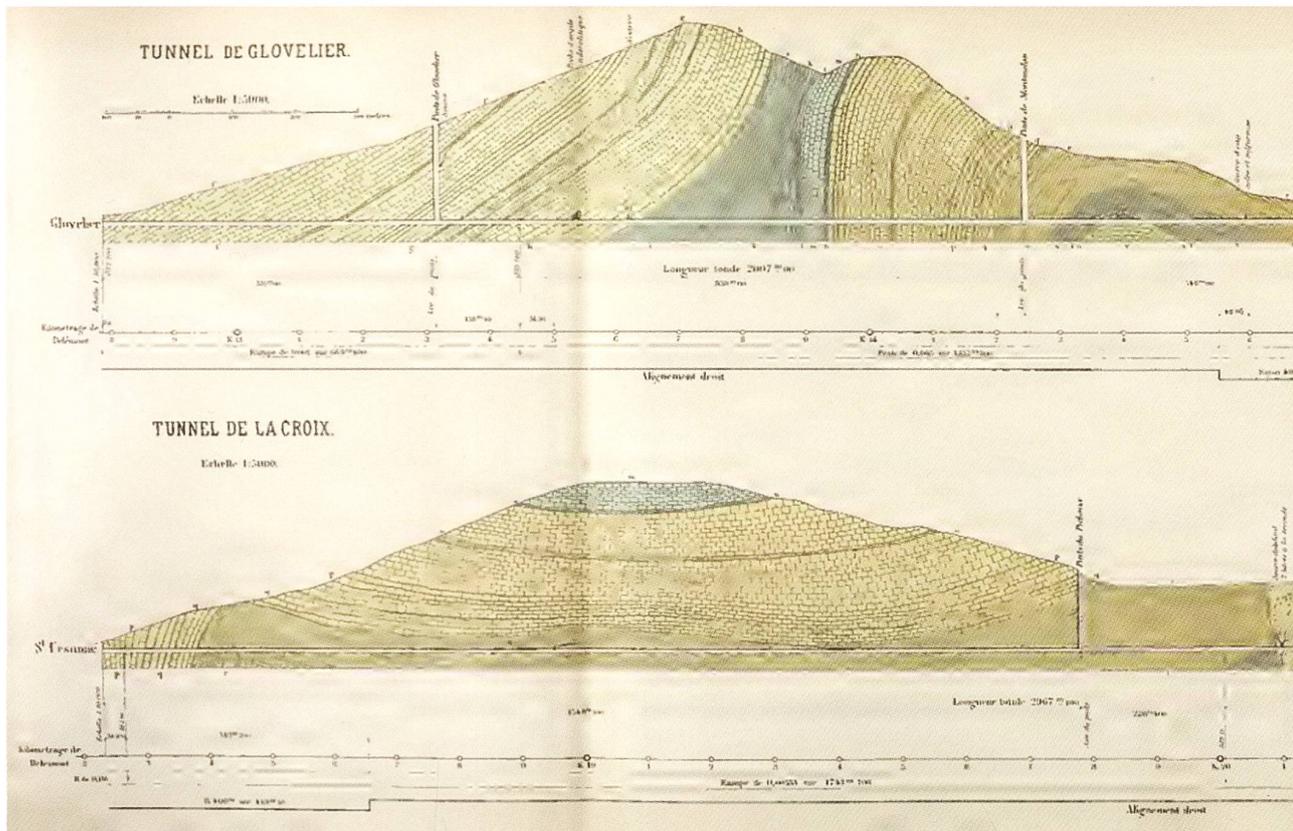
Fig. 42 : Profil géologique le long du tunnel du Hauenstein, montrant la répétition d'un même groupe de couches du Muschelkalk (en double trait gras pointillé) qui conduit à la formation d'une structure imbriquée typique. Détail, extrait de F. MÜHLBERG, en 1889a.

localité d'Olten, fut achevé vers la fin de 1857. Il fut le premier grand tunnel à être percé dans le Jura sur la base d'études qui avaient débuté dès 1852. Cet ouvrage est malheureusement aussi connu pour les difficultés hydrologiques rencontrées (voir Hydrogéologie, chapitre 3) et surtout pour le terrible accident du 28 mai 1857 qui, lors de l'incendie du boisage d'un puits, entraîna la mort de 52 ouvriers et de 11 sauveteurs, en raison de la présence de dioxyde de carbone.

Sur le plan structural, les travaux d'explorations géologiques au niveau du portail sud de l'ouvrage déterminent une situation relativement simple qui sera confirmée lors des travaux. En revanche, l'extrémité nord du tunnel est immédiatement considérée comme une zone fort complexe car les assises du Muschelkalk, qui ont normalement une puissance de 72 m, s'étendent sur plus de 1000 m, en gardant une inclinaison au sud pratiquement constante sur près de 500 m. Pour expliquer cette anomalie, le professeur François Lang de Soleure, membre de la Société helvétique des sciences naturelles, propose que cette situation soit associée à un pli couché en S dont le tunnel recouperait trois jambages. Par la suite, les différentes solutions

présentées font régulièrement appel à une suite de plis serrés, de faible ampleur, chevauchant des niveaux évaporitiques. Ces propositions paraissent peu probables du fait que toutes les observations conduisent à admettre l'absence de charnières importantes, et que toutes les assises sont en position normale. Friedrich Mühlberg est d'avis qu'on se trouve en présence de répétition d'un même groupe de couches du Muschelkalk qui, par chevauchements et plis-failles, conduit à la formation d'une structure imbriquée typique (MÜHLBERG, 1889a). Cette interprétation est illustrée par un profil (fig. 42) où le chevauchement du Jura plissé sur le Jura tabulaire, plus modestement déformé, se fait par une suite d'écaillés répétées reposant sur une semelle d'évaporites triasiques surmontant les assises tertiaires du Jura tabulaire. Conformément à l'enseignement d'Albert Heim dont F. Mühlberg fut un élève, la base de la zone écaillée présente des charnières attestant son évolution à partir de plis-failles, bien que dans cette situation aucun fait précis ne soit présenté pour donner crédit à cette proposition.

Les conditions hydrogéologiques de la zone chevauchante, dans le tunnel, avec ses assises du



Muschelkalk, sont exposées dans Hydrogéologie, chapitre 3. Elles sont caractérisées par deux types d'eau respectivement froides, réagissant aux précipitations, et subthermales, d'origine profonde. Une modification sensible du régime des sources en surface due à la construction du tunnel a donné lieu à des procès.

Les perturbations liées aux difficultés hydrologiques ont été la principale cause d'un retard de quelque dix-huit mois dans le percement du tunnel. Cela entraîna de graves incidences financières qui furent aggravées par les procès et par la nécessité d'évacuer par pompage les eaux qui s'accumulaient dans une galerie, dont la pente descendante ne permettait pas l'évacuation naturelle des eaux.

4. 1. 3. Meilleures appréciations des structures : tunnel du Bözberg

Presque à l'extrémité orientale de la chaîne du Jura, la localité de Brugg sur l'Aar se trouve sur le passage d'une ancienne voie romaine qui assurait déjà les échanges nord-sud à travers le Jura pour atteindre Bâle. Elle traversait la chaîne au niveau de son dernier chaînon, en direction de l'est, au niveau du col du Bözberg; de là, on gagne le Fricktal et le Jura tabulaire pour atteindre les bords du Rhin. Cet itinéraire s'impose assez rapidement comme une solution intéressante pour y établir une voie ferrée, bien qu'elle demande le percement d'un tunnel long de plus de 2 km, passant sous le relief du Linnerberg. La première étude géologique sérieuse est établie par Casimir Mösch (1827-1898) en 1867, mais elle présente une orientation assez différente de celle qui sera choisie pour réaliser le tunnel. Sur ce nouvel itinéraire, le tunnel

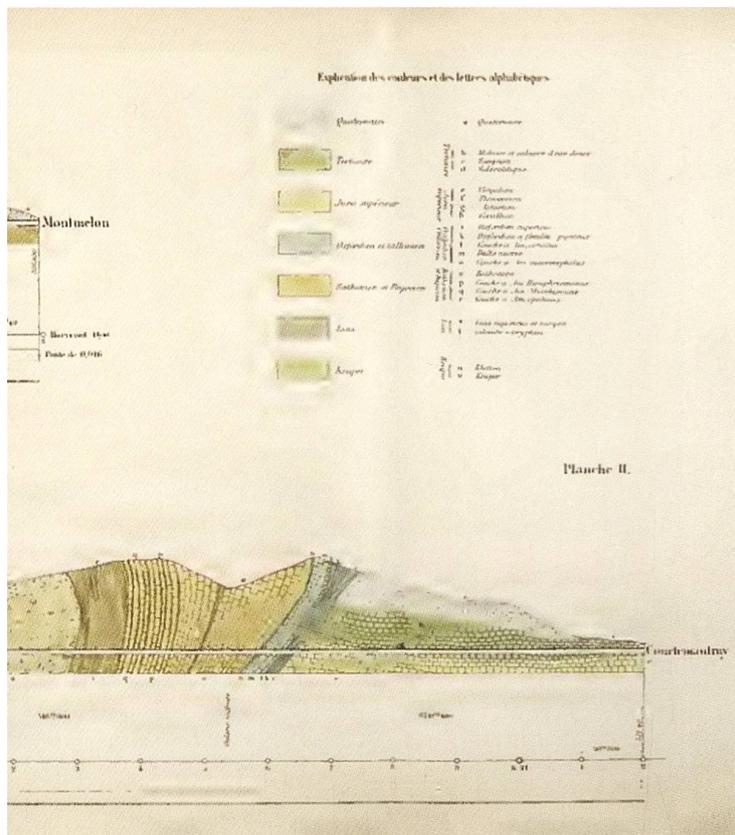


Fig. 43 : Deux profils à l'échelle 1:5000 extraits de *Coupes géologiques des tunnels du Doubs* de F. MATHEY en 1884. Orientation : sud-est à gauche, nord-ouest à droite.

sera percé entre 1874 et 1875, en bénéficiant des nouvelles données géologiques de C. Mösch, qui font ressortir une structure anticlinale centrale bordée par deux zones synclinales (MÖSCH, 1872). Celle située au sud se rattache à la zone du Jura plissée et culmine au Linnerberg, où elle est située à près de 1000 m au-dessus de celle plus au nord. Celle-ci se rattache au Jura tabulaire et est recouverte par des sédiments tertiaires subhorizontaux, qu'on retrouve plissés au sud. Les investigations de surface et les résultats du percement du tunnel conduisent C. Mösch à proposer une nouvelle solution dans laquelle les éléments situés sous le Linnerberg sont considérés comme faisant partie d'une structure synclinale chevauchante du Jura plissé s'avancant sur le Jura tabulaire peu déformé (MÖSCH, 1872). La déformation, affectant les séries du Trias supérieur jusqu'au Lias dans le Jura plissé, révèle

l'intensité du plissement. Malgré cette situation, la puissance de cette dernière formation peut être mesurée dans une zone peu perturbée où elle ne paraît pas dépasser 54 m. Cette importante donnée a été utilisée avec profit dans le traitement des structures rencontrées dans la région du Hauenstein situées plus au sud-ouest où, par suite d'écaillages, cette formation présente des affleurements très étendus.

4. 1. 4. Tunnels de Glovelier et de La Croix

Les travaux entrepris pour l'établissement des voies ferrées dans le Jura n'ont pas toujours contribué à la progression des connaissances géologiques qu'on pouvait espérer. Le percement des tunnels du Doubs a été entrepris sur la ligne rejoignant Delémont à Porrentruy, avec le tunnel de Glovelier

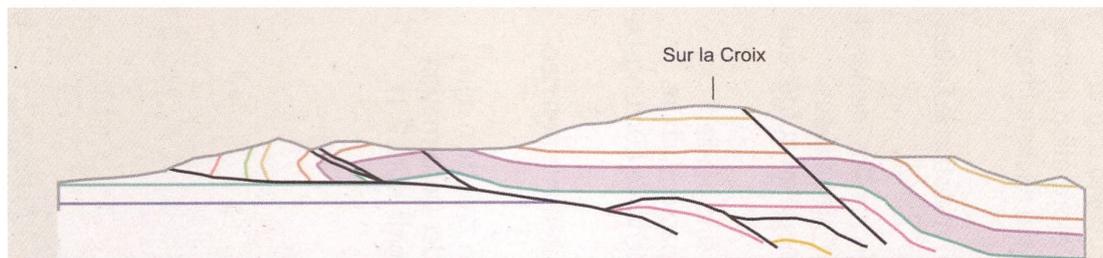


Fig. 44 : Interprétations récentes de la coupe du tunnel de La Croix tirée de *Modellierung bilanzierter Profile im Gebiet Mont Terri – La Croix (Kanton Jura)*. Extrait de Michael FREIVOGEL et Peter HUGGENBERGER en 2003. Orientation : nord-ouest à gauche, sud-est à droite. Longueur du tunnel : 3 km. Les Argiles à *Opalinus* sont représentées en violet. En comparant les figures 43 et 44, on distingue la zone où ces argiles aaléniennes ont, à l'époque de la construction du tunnel, été interprétées par un remplissage quaternaire.

(longueur 2 km entre Glovelier et Montmelon) et celui de La Croix (longueur 3 km entre Saint-Ursanne et Courtemaury). Le premier fut percé entre 1873 et 1875 et recoupe l'anticlinal assurant la limite ouest du bassin de Delémont. Le second percé en 1875, traverse l'anticlinal du Mont Terri, qui est devenu une structure célèbre depuis qu'il a été décrit par J. Thurmann. Le suivi géologique de cette entreprise est assuré, après le début des travaux de percement, par le géomètre Félicien Mathey (1826-1891). Il est l'auteur de deux profils à l'échelle 1:5000 (fig. 43, MATHEY, 1884), de quelques considérations structurales et d'informations précises sur ses récoltes de fossiles qui, pour leur détermination, ont bénéficié de l'aide de C. Mösch, Perceval de Loriol (1828-1908), Paul Choffat (1849-1919) et Frédéric-Louis Koby (1852-1930).

Dans les considérations structurales de l'époque, on a certainement regretté le manque de commentaires sur le charriage des assises du Jurassique du tunnel de La Croix qui, au niveau de son portail nord, reposent sur les assises tertiaires de l'Ajoie, surmontant elles-mêmes le Malm horizontal. Un géologue plus expérimenté aurait probablement pu donner une meilleure interprétation de la zone chaotique rencontrée dans les couches à *Opalinus*³ qui fut interprétée comme un remplissage de matériaux quaternaires. La complexité des structures

de cette zone a fait l'objet d'une étude en 2003 par Michael Freivogel et Peter Huggenberger (né en 1955), où ces auteurs ont figuré les différentes interprétations proposées depuis le percement du tunnel de La Croix (FREIVOGEL & HUGGENBERGER, 2003). La coupe géologique établie par ces deux auteurs pour le tunnel de La Croix par la méthode des coupes équilibrées (voir Tectonique, chapitre 8.7.) est représentée à la fig. 44.

Enfin, un travail récent a analysé la fracturation induite par la tectonique du Jura et celle produite par le percement du tunnel autoroutier du Mont Terri (Christophe NUSSBAUM (né en 1971) *et al.*, 2011). Ces recherches ont été faites dans les Argiles à *Opalinus* au sein du laboratoire souterrain du Mont Terri. Les travaux les plus récents dans ce secteur soulignent l'importance non seulement du décollement basal mais aussi celle d'un niveau de décollement secondaire dans les séries des Argiles à *Opalinus* (NUSSBAUM *et al.*, 2017), relatés dans le volume anniversaire des deux décennies de recherches dans le laboratoire souterrain du Mont Terri (BOSSART & MILNES, 2017). Ce laboratoire souterrain est présenté plus loin (Hydrogéologie, chap. 9.2.3.2.).

Cette première phase de construction des tunnels recoupant les structures du Jura conduit à souligner les différences existant entre la zone du Jura oriental, plus marneuse et plus érodée, et celles du Jura central et méridional plus calcaires et plus épaisses. Ces travaux mettent aussi en évidence l'importance des charriages et autres discontinuités qui affectent les structures profondes de la chaîne et qu'on retrouve tant dans les tunnels que dans la zone orientale de

³ Couche aussi appelée Argile à *Opalinus*, caractérisée par la présence importante du fossile d'ammonite *Leioceras opalinum* (REINECKE, 1818).

la chaîne où l'érosion a dégagé les terrains du Lias ou du Trias. Avant que d'autres grands tunnels amplifient la portée de ces premières données, les excursions préparées pour le congrès international de géologie de Zurich en 1894 (voir Tectonique, chapitre 5) permettent d'apporter une vue synthétique des structures du Jura suisse, telles qu'elles sont perçues à la veille du changement de siècle par les principaux acteurs dont les regards restent inspirés par la tradition des plis de soulèvement réguliers, alors que d'autres mettent en lumière l'importance des discontinuités observées lors du percement de cette première série de grands tunnels. Dans les deux premières décennies du siècle nouveau, une nouvelle série de tunnels, plus importants, plus profonds, conduira à la grande révolution structurale du Jura.

4. 2. Premières cartes de la Commission géologique suisse

4. 2. 1. Les précurseurs

En Suisse, les premières cartes géologiques sont liées à des initiatives privées, souvent soutenues par les cantons ou par des organismes indépendants comme les sociétés de sciences naturelles locales. Dans ces premières réalisations, le Jura est très bien servi par les cartes de :

Peter Merian (1821) : *Geologische Karte des Kantons Basel*

Jules Thurmann (1836) : *Carte orographique et géologique du Jura Bernois*

Adolphe Célestin Nicolet (1838) : *Plan géologique de La Chaux-de-Fonds*

Auguste de Montmollin (1839) : *Carte géologique du Jura neuchâtelois*

Albert Mousson (1840) : *Karte des Umgebungen von Baden, im Aargau*

Alphonse Favre (1843) : *Carte géologique du Mont Salève.*

En 1860, la Société helvétique des sciences naturelles, organisation faitière de l'activité scientifique en Suisse à cette époque, approuve la création de la Commission géologique suisse, une sorte de Service géologique aux moyens limités, dont l'objectif prioritaire est l'élaboration et la

publication d'une carte géologique détaillée de la Suisse. Le premier projet vise la réalisation d'une carte à l'échelle 1:50 000. Mais devant la faiblesse des moyens financiers disponibles, on est conduit à se rabattre sur l'édition d'une série de cartes à l'échelle 1:100 000. L'exécution des relevés est confiée à quelques géologues miliciens ayant fait leurs preuves dans d'autres activités et qui acceptent de s'investir dans cette tâche pour laquelle ils seront simplement indemnisés pour leurs frais de déplacements. Les cartes topographiques retenues pour servir de base à ce projet sont celles de l'atlas Siegfried, où les reliefs sont figurés par des hachures. Sur les seize feuilles au 1:100 000 couvrant la Suisse, sept d'entre elles concernent une partie du Jura mais aucune n'est totalement située dans la chaîne. Cette tâche est menée rapidement puisque les sept feuilles touchant le Jura sont publiées, dans leur première édition, entre 1876 et 1879, avec la collaboration des géologues mentionnés dans la liste suivante :

Feuille n° III, Listhal-Schaffhausen : Casimir Mösch, Peter Merian, Ulrich Stutz (1826-1894), und Inspektor Vogelgesang (1867)

Feuille n° XI, Pontarlier-Yverdon : Auguste Jaccard (1868)

Feuille n° XVI, Genève-Lausanne : A. Jaccard (1868 ou 69)

Feuille n° VI, Besançon-Le Locle : A. Jaccard (1870 ou 71)

Feuille n° VIII, Aarau-Zürich : Franz Joseph Kaufmann (1825-1892) & C. Mösch (1871)

Feuille n° II, Belfort-Basel : Albrecht Müller et A. Jaccard (1874)

Feuille n° XII, Fribourg-Berne : Victor Gilliéron (1826-1890), J. Bachmann & A. Jaccard pour le Jura (1875 ou 79).

Dans ces premières cartes, les données géologiques s'arrêtent à la frontière au-delà de laquelle ne sont figurés que quelques éléments topographiques. À partir des secondes éditions, l'information géologique sera souvent étendue aux territoires avoisinants grâce à des arrangements avec les organismes et les géologues des États voisins en reportant les données ainsi obtenues sur un canevas topographique très sommaire.

En complément de ces cartes, la Commission géologique édite la série des *Matériaux pour la Carte géologique de la Suisse*, une série de monographies présentant les particularités géologiques des régions couvertes par ces cartes dans le but d'en faciliter l'utilisation et la compréhension. Au cours des années, des suppléments sont publiés dans la même série, afin de faire part des nouveaux développements de la recherche. Pour le Jura, de nombreuses contributions accompagnent ces premières cartes de la Suisse au 1:100 000 (MÜLLER, 1862; MÖSCH, 1867; JACCARD, 1869; GREPPIN, 1870; MÜLLER, 1884; ROLLIER, 1894b).

Toutes ces contributions donnent la priorité à la stratigraphie et à la paléontologie reflétant les préoccupations de la science géologique de l'époque comme le confirme l'un des auteurs :

« La géologie du Jura doit donc être avant tout paléontologique et stratigraphique. [...] On n'oubliera pas d'ailleurs que j'avais à me préoccuper avant tout de tracer les limites des divers terrains, de faire en un mot une carte géologique plutôt qu'un traité de toutes pièces dans lequel seraient rapportées et réunies les observations qui ont été faites avant moi. » (JACCARD, 1869, p. 2 et 3).

Une brochure, éditée à l'occasion du 125^e anniversaire de la Commission géologique suisse, donne un aperçu historique de sa création et de ses tâches (Hermann FISCHER (né en 1935) *et al.*, 1985). Le développement des cartes hydrogéologiques est commenté dans Hydrogéologie, chapitre 8.

4. 2. 2. Les contributions d'Albrecht Müller, de Casimir Mösch et de Jean-Baptiste Greppin

Les publications d'Albrecht Müller (1862 et 1884) donnent une vue synthétique du Jura bâlois, de sa bordure septentrionale avec la Forêt-Noire jusqu'au Bassin molassique au sud. L'auteur relève que l'ensemble de ce secteur est marqué par trois zones structurales orientées ouest-est dont la complexité augmente en direction de la chaîne alpine; au nord, la couverture sédimentaire n'est que très légèrement basculée vers le sud; au-delà, le Jura tabulaire est simplement marqué par des

failles et de faibles ondulations, alors que des plis et d'importants charriages et écaillages affectent les séries du Muschelkalk de la zone méridionale du Jura plissé. Les figures en noir et blanc (voir fig. 41, page 124) illustrant ces accidents, représentent des couches parallèles. Les nombreux contacts anormaux de ces séries ne sont pas soulignés par une figuration spécifique; ils ne donnent pas ainsi une juste appréciation de ce travail. En 1884, l'utilisation de la couleur dans ces mêmes figures apporte une sensible amélioration de la représentation de ces importants accidents, sans cependant parvenir à imposer l'importance de ces structures. Cette situation est peut-être liée au fait que A. Müller, tout en insistant sur la portée et la fréquence des charriages de cette partie du Jura oriental, juge que la structuration de cette partie de la chaîne est associée à des venues magmatiques provoquant des soulèvements et des subsidences guidées par des failles longitudinales dont le rôle est incontestablement plus marqué que celui des pressions latérales d'origine alpines proposées par d'autres chercheurs (MÜLLER, 1860).

Dans sa présentation en 1867 de l'extrémité orientale de la Chaîne, Casimir Mösch reconnaît que celle-ci comporte deux domaines bien distincts. Au nord, des plateaux subhorizontaux surmontent les assises hercyniennes de la Forêt-Noire sous la forme de deux plateaux faiblement inclinés au sud. Celui situé plus au nord est principalement constitué par les assises du Muschelkalk, l'autre est couronné par le Dogger. Ce dernier s'avance jusqu'au second domaine au niveau du Jura plissé où domine une assise verticale du Trias. Pour expliquer ces structures, C. Mösch propose qu'elles représentent la partie élevée de synclinaux redressés, pincés et couchés vers le sud en direction de la profondeur (fig. 45, MÖSCH, 1867). En complément des profils traversant la région où dominent les plis, l'auteur analyse les différents aspects de la chaîne des Lägern qui termine la chaîne en direction de l'est, en montrant que cette structure anticlinale émerge des séries de la Molasse avec un cœur de Muschelkalk d'allure intrusif.

Ce travail de C. Mösch est complété par une présentation de la structure observée lors du percement de la chaîne par le tunnel ferroviaire du Bözberg. Cette contribution illustre l'attitude de

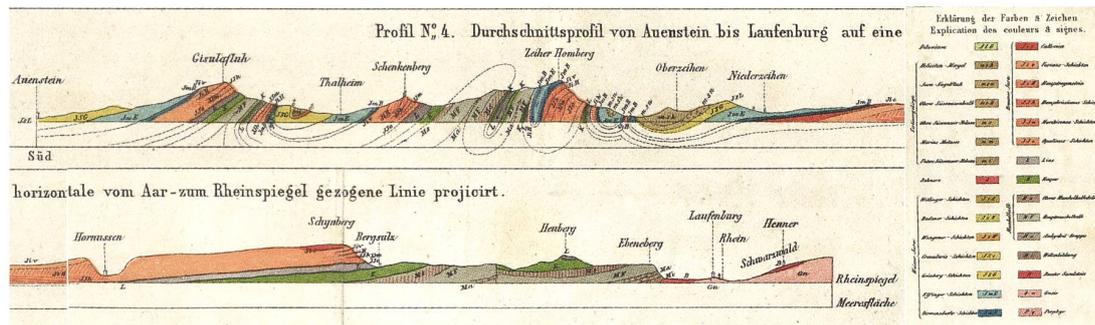


Fig. 45 : Profil géologique sud-nord extrait de *Geologische Beschreibung des Aargauer Jura und der nördlichen Gebiete des Kantons Zürich* de C. Mösch en 1867 (modifié).

la nouvelle Commission géologique suisse qui désire faire reconnaître l'utilité des études géologiques nécessaires pour assurer l'équipement de la Suisse moderne. Ce même souci conduit C. Mösch à présenter les résultats scientifiques des recherches d'or dans les alluvions de l'Aar et du Rhin qui se pratiquent alors dans ces rivières avec de bien modestes rendements. À l'époque où ces recherches sont entreprises (1830-1840), quelque quarante orpailleurs exploitent encore les alluvions des berges de l'Aar, entre Olten et la jonction de cette rivière avec le Rhin, pour des revenus se situant aux environs de 20 francs par journée de travail⁴. Les analyses de H. C. Escher von der Linth au début du XIX^e siècle montrent que, dans ces sédiments, l'or est présent sous forme de fines paillettes dans la proportion de 3,2 parties par milliard! Ces valeurs nettement inférieures à celles obtenues dans le cours du Rhin moyen montrent le peu d'intérêt pour l'avenir de ces exploitations.

Toujours dans la perspective de donner une visibilité aux études géologiques, C. Mösch présente des données se rapportant aux eaux thermales sur la bordure du Jura oriental où elles sont exploitées en plusieurs points dont ceux de Baden et de Schinznach et où elles permettent l'établissement de bains thermaux. Utilisant leur composition chimique pour tracer les terrains qu'elles ont traversés et leur température pour situer la

profondeur d'où elles parviennent, C. Mösch propose qu'à Baden on doive envisager que les eaux thermales proviennent d'une profondeur voisine de 1170 m, à un niveau où doivent être présents les niveaux du Trias inférieur (Bundsandstein); en effet, leur température est voisine de 47°C, dans un domaine où le gradient géothermique est de 1°C par 31,9 m. La chimie des eaux indique leur transit par des assises riches en sulfates (Muschelkalk et/ou Keuper) et la présence de strontium est mise en relation avec les assises du Lias. Les travaux réalisés à la même époque par d'autres auteurs sur ces eaux thermales sont présentés plus loin (Hydrogéologie, chapitre 2.2.5.1.).

Jean-Baptiste Greppin (1819-1881), géologue et médecin, consacre une partie de sa monographie géologique du Jura bernois à l'étude des sources et à des considérations sur l'infiltration des eaux de surface vers la profondeur, en s'appuyant sur les travaux de Joseph Fournet (1801-1869) en 1859 et ceux de E. Desor (GREPPIN, 1870). À cet effet, il présente une analyse des nombreuses sources reconnues et exploitées dans cette région, en s'efforçant de les classer en fonction de la situation géologique rencontrée dans les zones d'émergence. Il plaide pour qu'une grande attention soit accordée à l'environnement de zones de prélèvement, captages et puits, en évitant tout particulièrement les contaminations de ces eaux par les eaux usées de surface:

«Ainsi les emplacements pour les fumiers, les fosses à purin, les fosses d'aisance, les cloaques,

⁴ Soit aujourd'hui un peu plus de mille francs.

seront renfermés dans un espace imperméable et couvert tant pour empêcher toute filtration et évaporation que pour conserver, comme engrais, les matières qu'ils reçoivent.» (GREPPIN, 1870, p. 337)».

Ces utiles recommandations situent certainement les situations sanitaires rencontrées, à cette époque, dans ces régions relativement isolées. Elles s'inscrivent parfaitement dans le rôle éducatif et d'utilité publique que vise alors la Commission géologique. Les travaux de J.-B. Greppin dans le domaine des eaux souterraines sont analysés de manière plus approfondie dans la partie Hydrogéologie (voir Hydrogéologie, chapitre 2.2.5.3.). Ce naturaliste aux intérêts multiples s'est cependant intéressé à d'autres questions de la géologie du Jura; il s'est illustré notamment dans l'interprétation de l'âge du plissement de la chaîne (voir Tectonique, chapitre 8.6.).

4. 2. 3. Une vue d'ensemble du Jura géologique selon Auguste Jaccard

Auguste Jaccard est le géologue qui a assuré la cartographie de la plus grande surface des territoires du Jura des feuilles au 1:100 000 avec les cartes n° XI (Pontarlier – Yverdon), n° XVI (Genève – Lausanne) et n° VI (Besançon – Le Locle) qui couvrent le Jura nord-ouest de la Suisse de Genève au Jura neuchâtois, avec un petit complément sur la feuille n° II (Belfort – Basel) au niveau de l'Ajoie. Sur le plan structural, il décrit la variété des structures anticlinales qui peuvent présenter des voûtes relativement symétriques (Chasseral), des plis coiffés (Côte-aux-Fées, chaîne du Pouillerel), ou des plis renversées (Tête de Ran) (JACCARD, 1869). Il relève que cette structuration résulte principalement des déformations produites durant le Pliocène. Un exhaussement général tardif de la région jurassienne de près de 1000 m a favorisé la lente attaque de l'érosion et conduit à la formation de morphologies variées. En se rapportant aux structures observées, il estime que «*tout en étant déjà solidifiées, [les roches] étaient cependant douées d'une certaine plasticité qui leur a permis, dans bien des cas, de ployer sans se rompre.*» (JACCARD, 1869, p. 250). Il évoque différents types de dislocations,

dont des déchirements qui en dehors du décrochement de Pontarlier ne perturbent pas la continuité des assises qui gardent en toute situation des épaisseurs constantes. Dans le flanc sud du Val de Travers, il admet tout de même que le synclinal, qui marque la vallée, présente sur son flanc sud, un pli-faille subvertical.

Des cinq cartes qui sont évoquées dans cette note, seule la carte géologique de la Suisse au 1:100 000 nous est connue du fait qu'elle a été publiée. Les autres documents qui furent présentés lors de l'exposition universelle de Paris de 1878 sont donc restés à l'état de maquettes et ont été perdus⁵. Les efforts entrepris par A. Jaccard pour obtenir leur publication dans le cadre de la Société des sciences naturelles de Neuchâtel n'ont pas abouti. Cet organisme a certainement jugé qu'une telle opération, fort coûteuse, sortait de ses priorités en étant par son caractère international plus proche des objectifs que pouvait soutenir la Commission géologique suisse.

La zone morphologique nord-sud du décrochement de Pontarlier lui pose problème :

« Je suis assez embarrassé sur la question de savoir si l'on peut considérer les dislocations Sud-Nord comme des chaînons. En réalité, nous avons plutôt à faire à des déviations plus ou moins brusques des chaînons que je viens d'énumérer. [...] Enfin, plus au Nord, au-delà du fort de Joux, la dislocation consiste essentiellement dans le fait que les chaînons viennent de part et d'autre s'effacer en se croisant réciproquement. » (JACCARD 1869, p. 264-265).

Dans la zone du Chasseron, A. Jaccard juge que la grande voûte de l'anticlinal local est composée de plusieurs plis secondaires, se croisant sous des angles aigus et se confondant même tout à fait pour former un ensemble qui se confond avec la chaîne suivante, au-devant du Creux du Van (JACCARD, 1869, p. 265). Les plis individuels n'ont pas une signification par eux-mêmes, c'est

⁵ Il s'agit de la carte géologique du canton de Neuchâtel au 1:50 000, de la carte géologique du Jura franco-suisse au 1:25 000, de la carte hydrologique du Jura neuchâtois au 1:160 000 et de la carte des bassins hydrologiques, sources, etc., du Jura neuchâtois au 1:160 000.

leur association par regroupements qui prend une réelle signification.

A. Jaccard souligne que le Jura central qu'il a parcouru n'est pas formé par des ondulations structurales régulières et parallèles ; il souligne la diversité des formes, de l'étendue et de l'altitude des vals et des vallons. Ainsi certains d'entre eux sont presque aussi larges que longs (le val de Vaulion par exemple), d'autres sont réduits à une largeur d'une centaine de mètres seulement (extrémité orientale de la vallée de Joux à Orzeires). Quelques-uns n'atteignent pas une lieue (env. 4 km) de longueur (val de Ste-Croix, val des Fourgs), tandis que d'autres, comme le val de Joux, s'étendent sur une dizaine de lieues, en gardant transversalement une distance moyenne assez régulière d'une demi-lieue à peine ; les vallons de la région méridionale peuvent atteindre des altitudes allant jusqu'à 1500 m, ce qui est supérieur à l'altitude de sommets de bien des régions. Il mentionne également la présence de synclinaux fermés, dont celui de la vallée de la Brévine ; elle montre des bords relevés présents à ses deux extrémités, faisant de cette structure une cuvette qui pourrait être occupée par une importante étendue d'eau si elle n'était pas formée par des roches perméables. Il reconnaît la position généralement transversale des cluses, sans cependant admettre que cette relation soit aussi régulière que l'affirmait J. Thurmann. Il considère que « *quoique l'eau ait sans doute contribué à leur élargissement et à leur façonnement, ce ne sont point non plus de simples vallées d'érosion.* » (JACCARD 1869, p. 277). Comme d'autres chercheurs, il souligne le faible développement des cours d'eau du fait que les eaux issues des précipitations se perdent rapidement dans les fissures, entonnoirs et emposieux pour gagner les niveaux d'écoulement des vallées de basses altitudes.

En fin d'ouvrage, la présentation de trente journées d'itinéraires géologiques destinées à faciliter l'accès de chacun à la connaissance des phénomènes géologiques régionaux est une mesure qui permet de favoriser l'accès à cette discipline scientifique et de la pratiquer dans un environnement

très accessible. Il reprend ainsi une proposition de J. Thurmann pratiquée dans l'*Essai sur les soulèvements jurassiques*.

4. 2. 4. Les débuts d'une cartographie moderne

L. Rollier est l'auteur de la seconde édition de la feuille VII (1904) de la carte géologique de la Suisse au 1 : 100 000. Par son travail « *Structure et histoire géologique de la partie du Jura Central comprise entre le Doubs (Chaux-de-Fonds), le Val de Delémont, le Lac de Neuchâtel et le Weissenstein* » (ROLLIER, 1893), l'auteur présente une importante contribution pour illustrer les différents aspects géologiques de ce secteur du Jura en le complétant par des considérations gagnées sur les régions voisines du Jura neuchâtelois et vaudois. Au-delà des considérations stratigraphiques qui forment la majeure partie de ce travail, l'auteur aborde la tectonique par l'analyse des principaux anticlinaux et synclinaux de ce secteur de la chaîne en donnant une attention soutenue aux différents accidents irréguliers que sont les roches brisées, les chevauchements, les décrochements et les plis-failles.

À partir de 1899, la Commission géologique suisse décide de ne plus accompagner les cartes géologiques par d'importantes monographies mais de produire des notes explicatives qui paraîtront dans l'organe de la Société géologique suisse : les *Eclogae*, avec le but d'en faire des documents différents essentiellement pratiques pour faire connaître d'une manière objective et rapide les données recueillies par les auteurs. La première notice explicative de ce type est confiée à Eugène Renevier (1831-1906) et Hans Schardt pour accompagner la seconde édition de la feuille XVI de la carte au 1 : 100 000. H. Schardt est l'auteur de la section « *Jura et Plateau tertiaire* » (RENEVIER & SCHARDT, 1900). Dans le peu de pages disponibles, il tient à souligner que « *les allures des plis du Jura sont loin d'être aussi uniformes et régulières qu'on serait tenté de le croire* » (p. 84).

Chapitre 5

Les grandes réunions géologiques de la fin du XIX^e siècle

5. 1. Réunion extraordinaire de la Société géologique de France dans le Jura en 1885

5. 1. 1. Programme de la réunion

Après avoir fourni une impressionnante « *Liste des principales publications relatives au Jura français* » de 1742 à 1885 (357 références), le bulletin de la SGF évoque la séance du 23 août 1885, dans une des salles de la mairie de Champagnole, présidée par le Vaudois Gustave Maillard (1860-1891), puis par le Français Marcel Bertrand.

Le programme de l'excursion qui dure neuf jours, du 23 août au 1^{er} septembre 1885, amène successivement les congressistes à Champagnole, Sirod, Nozeroy, Morez, Saint-Claude, Molinges, Viry, Oyonnax, Nantua, Bellegarde et Belley où se termine l'excursion. Néanmoins, deux excursions avaient précédé la réunion proprement dite :

A) Le 21 août, dans les environs de Besançon pour examiner les faciès francs-comtois du Jurassique supérieur.

B) Le 22 août, vers Andelot-en-Montagne le matin, pour examiner au niveau d'un plateau de Dogger un étroit fossé d'effondrement (200-300 m de largeur) occupé par des assises argoviennes et calloviennes, pouvant localement être redressées à la verticale. L'après-midi, présentation de la chaîne de l'Euthe, sous la direction du géologue jurassien Paul Choffat ; cette chaîne se situe au niveau d'un plateau de Dogger, formée par deux séries de collines encadrant une vallée d'effondrement, où se situent des assises oxfordiennes parfois sub-horizontales ou parfois redressées à la verticale large de 100 à 200 m, se développant sur 50 km sous la forme d'une ligne, presque droite. Le texte du compte rendu est accompagné de cinq figures (fig. 46).

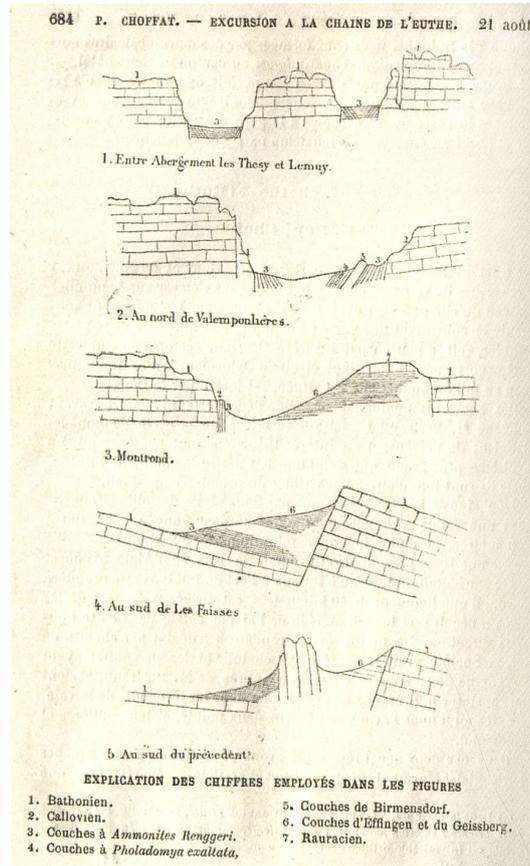


Fig. 46 : 5 figures relatives à l'excursion dans la chaîne de l'Euthe, sous la direction du géologue jurassien Paul Choffat, extraites de la *Réunion extraordinaire de la Société dans le Jura du 23 août au 1^{er} septembre 1885* de la Société géologique de France en 1885.

L'excursion de la SGF proprement dite aborde principalement les problèmes de la stratigraphie des séries du Jurassique supérieur :

A) La limite Oxfordien-Rauracien, en s'appuyant sur les faciès de l'Argovien.

B) Les niveaux du Malm, avec examen de la perturbation des lithologies liées aux récifs de coraux

et à la localisation dans le temps de certains faciès : oolitiques, coraux, en fonction de la direction SE-NW.

C) Le Purbeckien, avec la contribution de G. Maillard.

D) L'augmentation de l'épaisseur des niveaux du Jurassique supérieur en allant du nord-ouest au sud-est.

Lors de la troisième journée, le 25 août, le problème des cluses se pose; pour M. Bertrand, E. Renevier et Albert de Lapparent (1839-1908), la cause des cluses serait le fait de l'érosion qui aurait peu à peu ouvert une brèche dans les zones les plus faibles des couches, non déplacées, présentes de part et d'autre de la cluse. Pour C. Lory et l'abbé Émilien Bourgeat les cluses se sont produites sous l'influence d'agents dynamiques tout autre que l'eau. Celle-ci n'aurait fait que déblayer les blocs brisés comme le prouvent les traces de glissement et de pression présentes sur les couches situées sur le bord des cluses. M. Bertrand conteste absolument l'idée de l'orientation constante de la direction des cluses du Jura mais il reconnaît la présence des traces de glissement. Au cours de l'excursion, à la sortie de Morez, sur la nouvelle route de Saint-Claude comme on l'avait déjà constaté sur la route de la Billaude à Saint-Laurent, les couches redressées situées de part et d'autre de la cluse ne se trouvent pas dans le même alignement; il y a eu déplacement relatif par cisaillement ou par torsion. Pour M. Bertrand c'est l'occasion de rendre la Société attentive à l'importance dans la chaîne du Jura de failles avec déplacement – les décrochements – alors encore regroupés sous la dénomination de failles à déplacement horizontal. Elles sont à la composante horizontale du mouvement ce que les failles ordinaires sont à la composante verticale. D'après leur mode même de production, elles sont ordinairement transversales comme les autres sont longitudinales et les parois en sont striées horizontalement comme celles des failles ordinaires le sont verticalement. Seulement, de même que les deux composantes horizontale et verticale se superposent pour produire le mouvement d'ensemble, les deux sortes de glissements peuvent aussi coïncider et donner lieu à tous les intermédiaires.

« Ces plans de torsion et de déplacement horizontal ont très ordinairement dans le Jura déterminé

la place des cluses, comme c'est le cas ici, comme c'était le cas hier auprès de Morillon [...] De Morez à Pontarlier, je ne connais pas moins de six accidents semblables, les deux déjà mentionnés, celui des Planches, moins accusé, celui de Pontarlier à la Cluse, celui du Val des Hôpitaux, et enfin un dernier qui, de Mouthé se dirige vers l'est de Remoray. Dans celui-là, une partie de la zone de torsion est restée accessible à l'observation, et on peut constater que sur une partie de son parcours la torsion a bien déterminé des glissements, mais non pas un glissement d'ensemble correspondant à une faille unique. Ce sont au contraire une série de glissements parallèles, déterminant soit l'amincissement et l'étirement local des couches, soit de petites failles qui ne se suivent pas loin. Comme pour l'abaissement d'une région par une série de failles en échelon, le déplacement d'ensemble est la conséquence et la somme d'une série de déplacements partiels. » (S.G.F., 1885, p. 789).

5. 1. 2. Les plis en éventail

Dans la région de Saint-Claude, M. Bertrand fait remarquer qu'assez souvent, sur les bords externes des anticlinaux, les couches verticales sont renversées avant de reprendre leur position horizontale (fig. 47, S.G.F., 1885, p. 787). Lorsque ce phénomène se présente sur les deux flancs des anticlinaux, on a comme une première indication de la structure en éventail. E. Renevier fait observer que ces accidents locaux peuvent être un fait postérieur à la formation même du pli, et il serait tenté d'y voir un simple résultat du vide produit par le synclinal au pied du flanc de l'anticlinal: il y aurait eu « *poussée au vide* ». Ces structures sont marquées par des renversements tant du côté français que du côté suisse. Pour M. Bertrand il s'agit plutôt d'une sorte d'oscillation des bancs autour de leur orientation moyenne, sans relation avec les grandes structures en éventail des Alpes. Ces types de structures fréquents dans les zones de plissements énergiques et que l'Autrichien Eduard Suess (1831-1914) désigne par le terme de « *Blatt* », ne sont désignés par aucune expression française.

L'excursion visite la curieuse voûte « *le chapeau de gendarme de Montépile* » (fig. 48, S.G.F., 1885, p. 807) formée par les calcaires du Valanginien plissés reposant au-dessus des assises du Portlandien non affectées par la

Fig. 13. — Coupe de la retombée ouest de la voûte de Morez
(route de Saint-Claude).

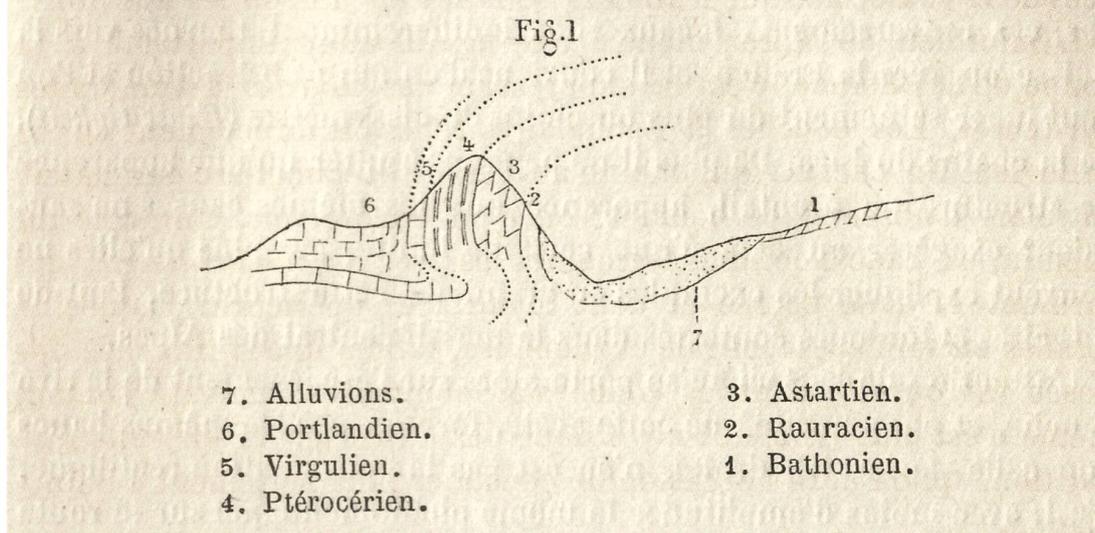


Fig. 47 : Coupe dans la région de Saint-Claude par Marcel Bertrand extraite de la *Réunion extraordinaire de la Société dans le Jura du 23 août au 1^{er} septembre 1885* de la SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE en 1885.

Fig. 19. — Coupe du « chapeau de gendarme » de Montépile.

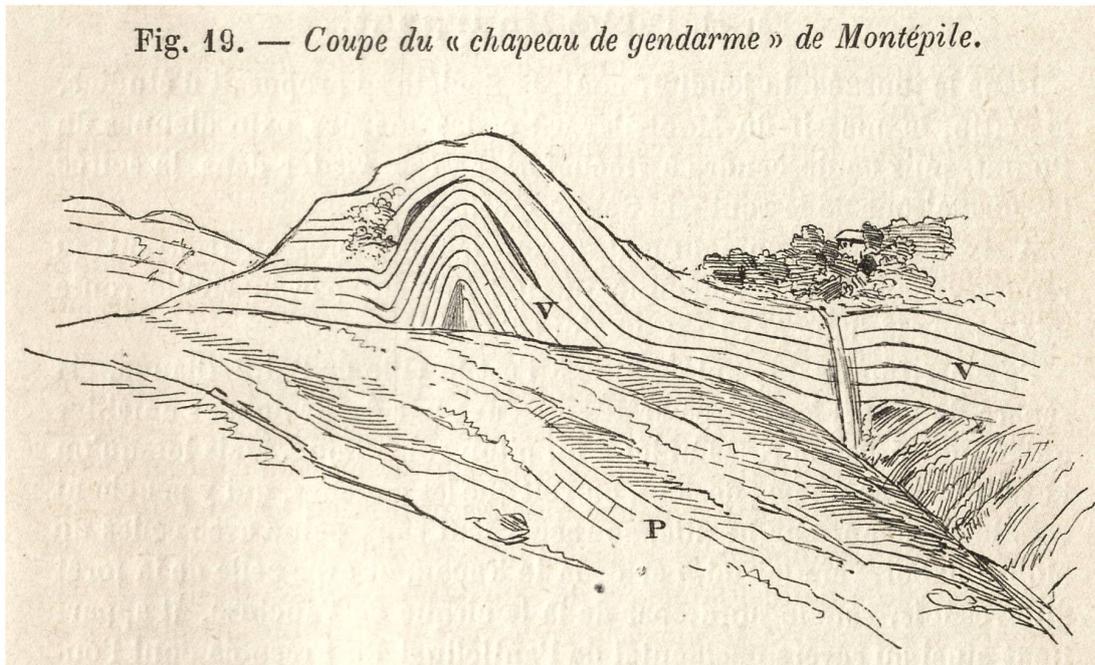


Fig. 48 : « Le chapeau de gendarme de Montépile » extrait de la *Réunion extraordinaire de la Société dans le Jura du 23 août au 1^{er} septembre 1885* de la SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE en 1885.

déformation. C'est encore un cas de plissement disharmonique provoqué par le glissement des couches crétacées au niveau des assises marneuses du Purbeckien.

D'autres structures disharmoniques sont observées au niveau du col du Pontet, au niveau des marnes de l'Oxfordien, qui, d'une épaisseur normale qui dépasse 200 m, se trouvent réduites par la déformation à moins de 60 m.

C'est au cours de cette réunion extraordinaire de la S.G.F. de 1885 que l'abbé Bourgeat (1849-1926) défend l'idée que le bassin sédimentaire du Jura fut marqué par des îlots d'émersion. Cette idée explique l'absence de tout sédiment allant du Jurassique supérieur au Crétacé dans le secteur de Lons-le-Saunier et Poligny et permet d'expliquer la présence de débris végétaux particulièrement bien conservés, rencontrés dans le Corallien de Sellières et dans l'Astartien de Châtelneuf. Cette proposition défendue avec force n'a pas été retenue.

5. 2. Congrès géologique international de Zürich de 1894 et ses conséquences

(Livret-guide géologique dans le Jura et les Alpes de la Suisse, 1894)

En 1894, la Suisse est désignée pour accueillir le VI^e Congrès géologique international à Zurich. À cette occasion, cinq excursions sont organisées pour permettre aux congressistes de visiter différentes parties du Jura sous la responsabilité de guides locaux. Ils ont préparé des textes et des illustrations servant d'introduction afin d'aborder les zones visitées, sans qu'un texte de synthèse assure la présentation de la chaîne dans son ensemble. Certaines présentations locales peuvent être qualifiées de traditionnelles, alors que d'autres sont nettement plus novatrices. Parmi les premières, Auguste Jaccard et Louis Rollier, deux grands cartographes de la géologie du Jura central, donnent de cette région une représentation essentiellement marquée par les douces et régulières ondulations d'un manteau sédimentaire parfaitement continu sans déchirure de failles; Hans Schardt et Friedrich Mühlberg, deux représentants de la nouvelle génération, proposent des coupes dans lesquels les anticlinaux sont moins réguliers et très souvent marqués par des failles et des chevauchements tout

particulièrement spectaculaires dans la partie orientale de la chaîne visitée sous la conduite de F. Mühlberg. Ce dernier a essentiellement présenté ses idées sur le Jura oriental par des introductions et des comptes rendus d'excursions qu'il organisait pour des sociétés géologiques locales, nationales et finalement pour ce Congrès international de géologie. Au cours de toutes ces manifestations, il était parvenu à faire reconnaître le style particulier de cette partie du Jura marquée par d'importantes zones de charriages, bien qu'il manifeste une modestie à se faire reconnaître comme un géologue particulièrement capable.

En 1888 une excursion avait été organisée dans le Jura bernois entre Delémont et Bienne où les participants avaient été conviés à examiner la régularité du plissement d'un secteur du Jura marqué par une suite de voûtes régulières et de synclinaux bien dessinés. La Société avait pris alors en 1894 la décision d'organiser une autre excursion dans cette même chaîne afin d'y observer, 25 km seulement plus à l'est, entre Liestal et Olten, des structures fort différentes, marquées par d'importants chevauchements et charriages dans la chaîne du Passwang et du Hauenstein, ainsi que dans les cluses.

Dans ce secteur de couverture relativement mince, F. Mühlberg présente des plis étroits, souvent érodés jusqu'au Trias, où se situent de nombreux charriages, dont certains sont de grande ampleur (plusieurs kilomètres). Dans la région genevoise, H. Schardt illustre le plissement d'une épaisse couverture jurassique augmentée par les assises du Crétacé absentes des secteurs situés à l'est de Bienne. Les larges anticlinaux de la zone interne dans la région genevoise présentent d'importantes failles couchées, des chevauchements et de spectaculaires failles transversales.

L'utilisation d'échelles très différentes pour assurer la présentation de l'ensemble des coupes à travers le Jura ne facilite malheureusement pas la comparaison des styles tectoniques rencontrés dans les différentes parties de la chaîne et ne permet pas de souligner leurs différences.

Peu avant le Congrès, H. Schardt avait déjà présenté une note consacrée à l'extrémité de la région genevoise où il commentait les aspects stratigraphiques et structuraux de la chaîne du Vuache et des chaînons voisins s'étendant jusque dans les zones alpines voisines (SCHARDT, 1891); il proposait que la structure régionale de cette région se trouve marquée par différents déplacements horizontaux de la couverture

sédimentaire et estimait que le parallélisme des chaînes du Salève et du Crêt d'Eau avec celle de la zone alpine de la région du lac d'Annecy s'explique par l'action d'une même poussée horizontale (refoulement), d'origine alpine, dirigée du sud-est au nord-ouest, qui a agi perpendiculairement à la direction de ces structures. Pour l'auteur, les décrochements affectant la chaîne du Salève sont directement associés à ce type de déplacements. Ils jouent également un rôle majeur au niveau de la chaîne du Vuache qui s'aligne sur un tel accident. Ces propositions audacieuses ne sont étrangement pas reprises dans le livret guide du Congrès (SCHARDT, 1894) où l'auteur se distingue cependant, sur le plan structural, par une suite de belles coupes illustrant la chaîne du Reculet et son environnement avec des chevauchements plongeant tant à l'est qu'à l'ouest et qui se suivent bien au-delà de la frontière franco-suisse (fig. 49). L'auteur fait ainsi ressortir l'importance des cassures associées aux anticlinaux en montrant que celles-ci peuvent être longitudinales ou transversales comme on le constate au Salève. Les cassures transversales majeures de ce secteur, que l'auteur avait présentées dans son travail antérieur (SCHARDT, 1891) illustrent également la continuité de ces structures dans les Alpes et le Jura. Dans le Jura central, les présentations de A. Jaccard et L. Rollier destinées au Congrès s'appuient largement sur leurs importants travaux cartographiques (JACCARD, 1869, 1870 et 1893; ROLLIER, 1893) dont ceux ayant accompagné les cartes au 1:100 000 de cette partie du Jura. Basée sur des travaux orientés principalement vers la stratigraphie, la contribution structurale de ces auteurs pour illustrer les excursions II et III du Jura central est fort modeste. Pour remédier partiellement à cette situation, le Neuchâtelois Léon du Pasquier (1864-1897), jeune élève d'Albert Heim remet aux congressistes visitant le Val de Travers, une planche d'illustrations où il a figuré sa vision de la structure locale, marquée par des failles et des chevauchements qui donne ainsi une présentation sensiblement différente de la vision traditionnelle. Elle fera l'objet de publications ultérieures (Du PASQUIER 1893-94a, b, c).

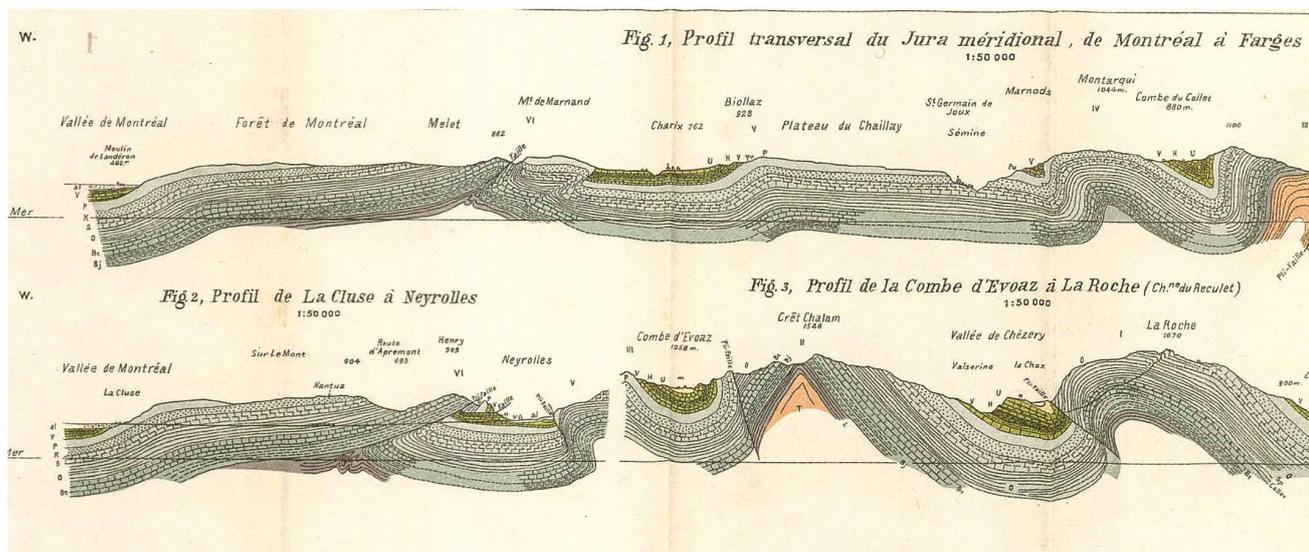
En présentant l'excursion IV consacrée à la géologie des environs de Bâle, Carl Schmidt (1862-1923) utilise les altitudes topographiques et structurales de l'environnement bâlois pour en faire ressortir le découpage structural. Au nord de la cité, les

horsts hercyniens des Vosges et de la Forêt-Noire séparés par le Graben du Rhin, dominant nettement le paysage. Dans le secteur sud-ouest de la Forêt-Noire (Dinkelberg), la couverture triasique qui couvrait l'ensemble de ce secteur est encore préservée de l'érosion; elle permet de situer le léger basculement de ces assises au sud jusqu'au Rhin et au-delà, où elles forment la base des assises sur lesquelles reposent les roches jurassiques, puis, localement, tertiaires du Jura tabulaire bâlois. Cette couverture se poursuit au sud, où elle va rencontrer les séries mésozoïques chevauchantes du Jura plissé et rapidement être surmontée par les affleurements de gypses du Keuper puis de ceux du Muschelkalk.

La bordure est du Graben du Rhin, située à l'est de Bâle, est marquée par une nette flexure qui se poursuit jusque dans le Jura tabulaire bâlois. Au niveau de Bâle, l'abaissement qu'elle provoque est de l'ordre de 1000 m; 8 km plus au sud, au niveau d'Arlesheim, où la flexure affecte le Jura tabulaire, l'abaissement n'est plus que de 400 m. À l'époque du Congrès international de Zurich, la limite ouest du Graben du Rhin est encore assez incertaine. Sa position présumée permet tout de même de situer son influence en direction du sud, où les plis bien marqués du Jura occupent une position plus septentrionale que celles qu'ils occupent dans les régions situées de part et d'autre du graben. C. Schmidt fait remarquer que les deux larges bassins tertiaires, de Laufon puis de Delémont, qui se trouvent dans la continuité du Fossé rhénan, peuvent être évoqués comme étant des structures influencées par la subsidence du Fossé du Rhin au cours du Tertiaire (SCHMIDT, 1894).

5. 2. 1. Le rôle important de Friedrich Mühlberg

L'excursion consacrée au Jura oriental sous la direction de F. Mühlberg est celle qui fait le mieux ressortir certes la complexité de la chaîne, mais surtout la progression de sa connaissance à l'époque du Congrès international. Au cours des années ayant précédé cette manifestation, par des articles destinés à servir de notice ou à des comptes rendus d'excursions de sociétés géologiques locales ou nationales, F. Mühlberg avait souligné l'importance des chevauchements et des charriages



affectant cette partie de la chaîne (MÜHLBERG, 1881, 1886, 1892, 1893). En s'appuyant sur les données de sa cartographie et ceux des travaux associés à la construction des tunnels ferroviaires, il avait montré l'importance de ces accidents tectoniques, marqués par des écaillages et des charriages de la couverture, illustrant ainsi une avancée de plusieurs kilomètres du Jura plissé sur le Jura tabulaire, resté globalement subhorizontal.

Il avait reconnu que la zone des charriages les plus importants est située dans le prolongement vers l'est de la chaîne du Mont Terri (chaîne de Lomont) ; en effet, des structures de ce type s'y développent surtout à partir des régions situées immédiatement au sud du prolongement de l'extrémité orientale du Fossé rhénan, en étant particulièrement marquées au sud de la Forêt-Noire ; de là, elles se poursuivent, en direction de l'est jusqu'à l'extrémité orientale de la chaîne dans une région où les charriages perdent progressivement de l'importance.

Par son illustration (fig. 50), F. Mühlberg montre l'importance des plans de chevauchement étendus, faiblement inclinés au sud, où les niveaux évaporitiques du Trias, tectoniquement perturbés, forment une semelle d'assises allant du Muschelkalk au Dogger, en présentant souvent des pendages parallèles aux plans de chevauchement (MÜHLBERG, 1894). Néanmoins, localement, les

masses charriées sont marquées par des écaillages, avec plis à plans axiaux sub-verticaux. La masse charriée s'étend ainsi largement sur un Jura tabulaire, affectée à ce niveau par les dernières ébauches de plis, dont certains sont encore couchés au nord. La partie sommitale des assises, situées sous le charriage, montre un Malm érodé, surmonté par des formations tertiaires concordantes.

Pour Emmanuel de Margerie, les cartes géologiques de F. Mühlberg, tout particulièrement celle du Hauenstein qu'accompagne une grande planche de coupes, « semblent amener la figuration cartographique de la géologie du Jura à un point en quelque sorte définitif » (DE MARGERIE, 1922, P. 58). Vers la fin de sa vie F. Mühlberg est l'auteur d'une grande planche en couleurs figurant trente-six coupes parallèles nord-sud de la région du Hauenstein mettant en lumière le détail, la diversité et l'importance des charriages de ce secteur dans un document qui reste inégalé (MÜHLBERG, 1915).

Malgré les apports remarquables de ce savant, il ne sera pas celui qui aura l'honneur d'être le premier géologue à proposer que l'ensemble du Jura doive être considéré comme une large nappe plissée et décollée au niveau des évaporites du Trias, bien que les données qu'il avait révélées aient pu et, peut-être, dû le conduire à proposer cette solution, au moins pour un large secteur du Jura oriental.

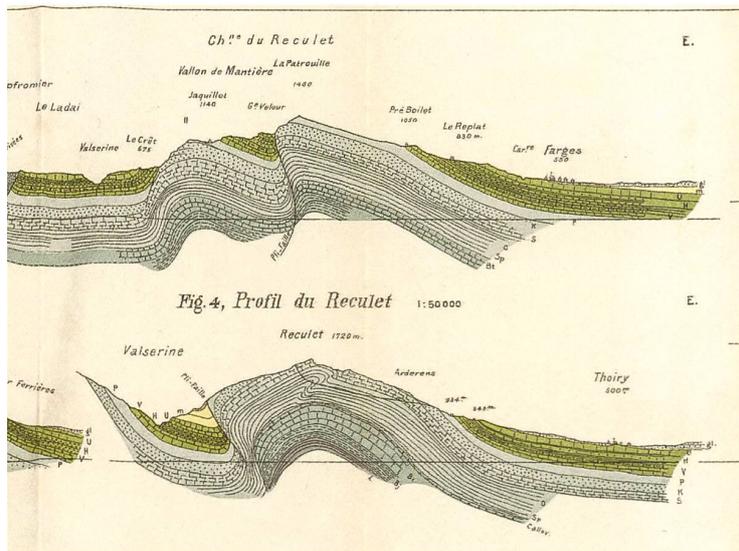


Fig. 49 : Coupes illustrant la chaîne du Reculet extraites de *Excursion géologique dans le Jura méridional*, In : *Livret-guide géologique dans le Jura et les Alpes de la Suisse* par H. SCHARDT en 1894.

5. 2. 2. Opposition entre Friedrich Mühlberg et Gustav Steinmann (1856-1929)

Le Jura tabulaire du nord-est de la Suisse s'étend au nord du Jura plissé jusqu'à la bordure des massifs hercyniens des Vosges et de la Forêt-Noire; cette région, et la zone du Jura plissée qui lui fait suite en direction méridionale, furent, au cours des premières décennies du XX^e siècle, un terrain d'intenses activités géologiques et de controverses. Au début de l'exploration du Jura, cette zone subtabulaire faisant suite à la couverture sédimentaire de la Forêt-Noire avec un faible plongement au sud, avait été utilisée pour établir, par la paléontologie, l'âge des assises de cette partie de la chaîne. On avait rapidement reconnu qu'elle portait des dépôts tertiaires discordants et était affectée par de nombreuses cassures méridiennes surtout présentes dans la Forêt-Noire. Celles-ci pouvaient se poursuivre au sud dans le Jura plissé où elles auraient, peut-être, influencé le plissement.

En 1892, Gustav Steinmann publie une courte note accompagnée d'un croquis structural s'étendant de l'extrémité méridionale du Fossé rhénan avec la partie méridionale des Vosges et de la Forêt-Noire, jusqu'au Bassin molassique situé entre le lac de Bièvre à l'ouest et la localité d'Aarau à l'est. Il englobe de ce fait le Jura oriental, avec le Jura tabulaire au nord et le Jura plissé au sud,

dont la zone des grands charriages. Cette illustration (fig. 51, STEINMANN, 1892) fait apparaître nettement qu'au-delà de la limite méridionale du Fossé rhénan, un groupe de cinq plis du Jura plissé, d'extension latérale limitée, s'avancent nettement, sous forme d'arcs convexes vers le bassin tertiaire de Laufon. Plus au sud de ces éléments, la chaîne du Mont Terri d'extension latérale est-ouest, forme une nette coupure qui traverse tout le secteur. À partir des régions situées à l'est d'une ligne prolongeant la bordure orientale du Fossé, cette coupure est marquée par la zone des grands charriages du Jura oriental qui, en diminuant d'importance, s'étend jusqu'à l'extrémité orientale du Jura plissé. Au sud de la zone des charriages, les chaînes du Hauenstein et du Passwang s'appuient et se fondent avec la zone des grands chevauchements comme le fait, tout à l'ouest de ce croquis, la chaîne du Chasseral avec ses ramifications. L'ensemble des éléments structuraux majeurs de cette zone et de nombreux accidents secondaires qui en perturbent localement la continuité, sont considérés par G. Steinmann comme étant liés à des systèmes de cassures transversales qui apportent la preuve que la structuration de la chaîne du Jura est très dépendante d'un important réseau de failles et de flexures dont la trame se lit également dans le découpage de la Forêt-Noire.

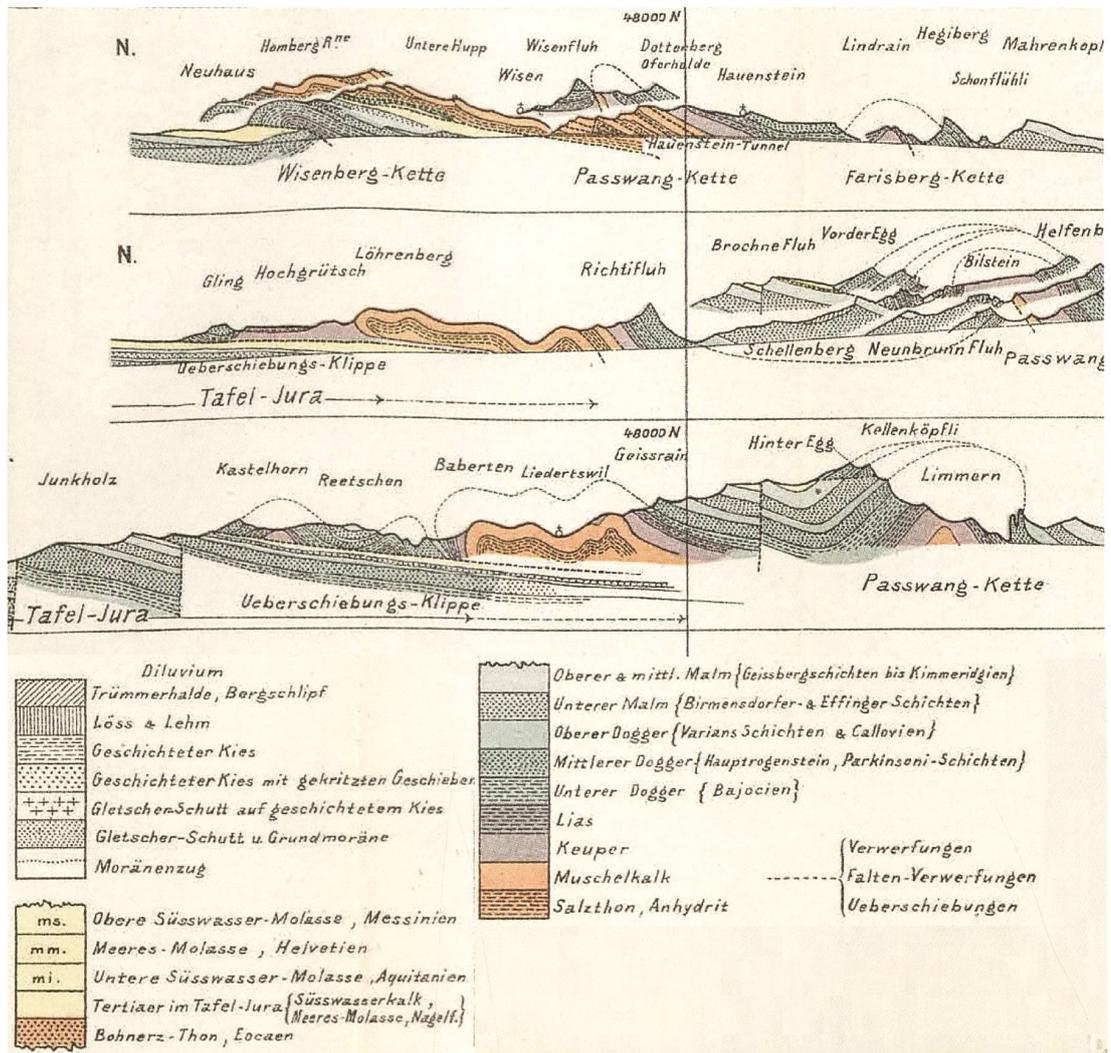


Fig. 50: Coupes extraites de *Esquisse tectonique du Jura oriental*. In: *Livret-guide géologique d'excursions dans le Jura et les Alpes de la Suisse*, par F. MÜHLBERG en 1894 (modifié).

G. Steinmann désirait connaître l'évolution de ces structures en direction du sud, là où elles atteignent le Jura. À cet effet, il entreprend des recherches dans le secteur de la limite méridionale du Fossé, avec des reconnaissances dans le Jura plissé voisin. Les travaux de cartographie qu'il entreprend avec ses assistants l'amènent jusque dans le Jura plissé. Ils le conduisent à rejeter totalement la présence des importants charriages que F. Mühlberg a décrits dans le secteur du Jura situé en bordure du Bassin molassique. Il considère que

les dislocations cassantes qu'on y rencontre sont en fait des failles qui, par leur direction, se rattachent à deux systèmes également présents dans la Forêt-Noire. Dans l'article où ces faits sont présentés (STEINMANN, 1902), l'auteur n'avance que peu d'éléments de poids pour soutenir ses propositions, si ce n'est un croquis tectonique, placé sur une topographie sommaire où sont simplement évoqués les cours d'eau (fig. 52). La trace de deux failles majeures y est située, recoupant une géologie qui n'est précisée que par les localisations de

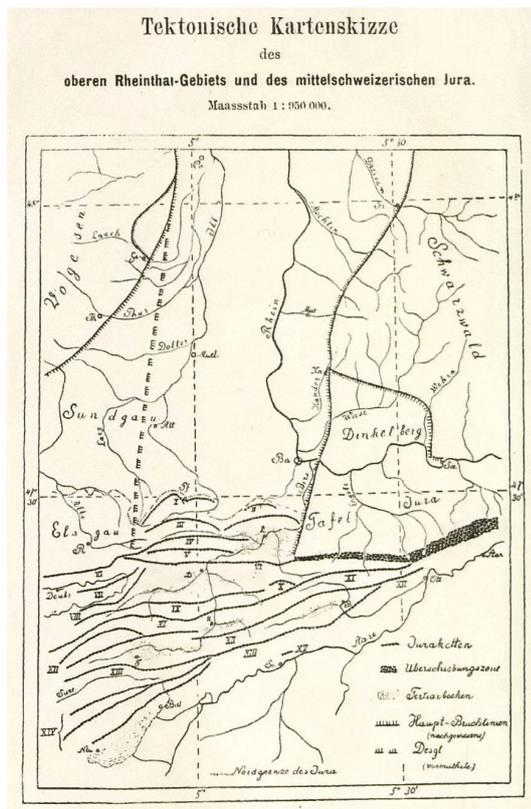


Fig. 51 : Carte tectonique montrant le contact entre le Jura et la vallée du Rhin extraite de *Bemerkungen über die tektonischen Beziehungen zwischen der oberrheinischen Tiefebene zu dem nordschweizerischen Kettenjura* par G. STEINMANN en 1892.

dépôts tertiaires et de la limite d'assises du Malm. Pour l'auteur, les deux grandes failles limitent des affaissements triangulaires qui conduisent à la répétition de certains niveaux repères que F. Mühlberg a interprété comme étant des redoublements de niveaux provoqués par charriages. Il relève aussi que les plis du Hauenstein et du Graiterly situés à l'ouest de la zone des chevauchements, présentent une allure structurale simple qui contraste avec la zone des grands chevauchements, située plus à l'est, décrits par F. Mühlberg, J.-B. Greppin, L. Rollier et August Rothpletz (1853-1918). Tous ces chercheurs associent les structures de ce secteur à d'importants chevauchements qui sont particulièrement bien mis en valeur dans les cluses d'Oensingen et de Mümliswil, entre Soleure et Aarau. Là, les affleurements étendus de

Dogger autochtone du fond de ces deux cluses sont chevauchés par le Dogger allochtone couronnant les hautes crêtes de ces paysages. Ces faits sont déjà signalés par A. Gressly dont des dessins évoquent des redoublements par charriage (GRESSLY, 1837-1841).

À la suite d'une visite de ces lieux, G. Steinmann conteste que des chevauchements affectent ces chaînes et soient représentés au niveau des cluses; il conteste aussi les publications et les illustrations faisant état d'importantes zones de charriages au niveau des anticlinaux du Jura oriental, tout particulièrement celles situées en bordure du Bassin molassique, au niveau des cluses d'Oensingen et de Mümliswil. Il propose que les structures visibles s'expliquent par des affaissements en coin limités par la rencontre de deux systèmes de failles, les unes parallèles aux plis, les autres orientées NNE-SSW. Ces cassures provoquant le redoublement de niveaux repères ne sont donc pas associées à des chevauchements mais à des failles présentes tant dans le Jura plissé que dans le Jura tabulaire. Il importe donc de reprendre par de nouveaux travaux la cartographie des études régionales plus poussées, tant au niveau du Jura plissé que du Jura tabulaire afin de suivre dans le temps et l'espace l'histoire de l'évolution de ce secteur du Jura marqué par des failles.

Pour F. Mühlberg soutenu par A. Buxtorf, l'analyse de G. Steinmann manque de rigueur tant au point de vue des faits que par ses interprétations. Il signale même qu'à l'occasion de récentes visites de terrain, il n'a pas pu retrouver la trace des failles proposées et figurées par son contradicteur. Il y répond par les données qu'il avait rassemblées pour la présentation des excursions qu'il a dirigées dans ces régions où le détail et l'importance des zones de charriages sont souvent analysés et présentés par des illustrations suggestives et précises. À ses yeux, les chevauchements sont un fait que confirme l'étude de la majorité des anticlinaux de ce secteur: ils sont régulièrement présents dans les structures dissymétriques des plis de ce secteur où la géométrie de ces mêmes plis s'écarte sensiblement des voûtes qui sont normalement envisagées. Les structures observées sont considérées être le résultat de la poussée subie par les versants sud qui viennent recouvrir les flancs nord; par érosion, ces structures

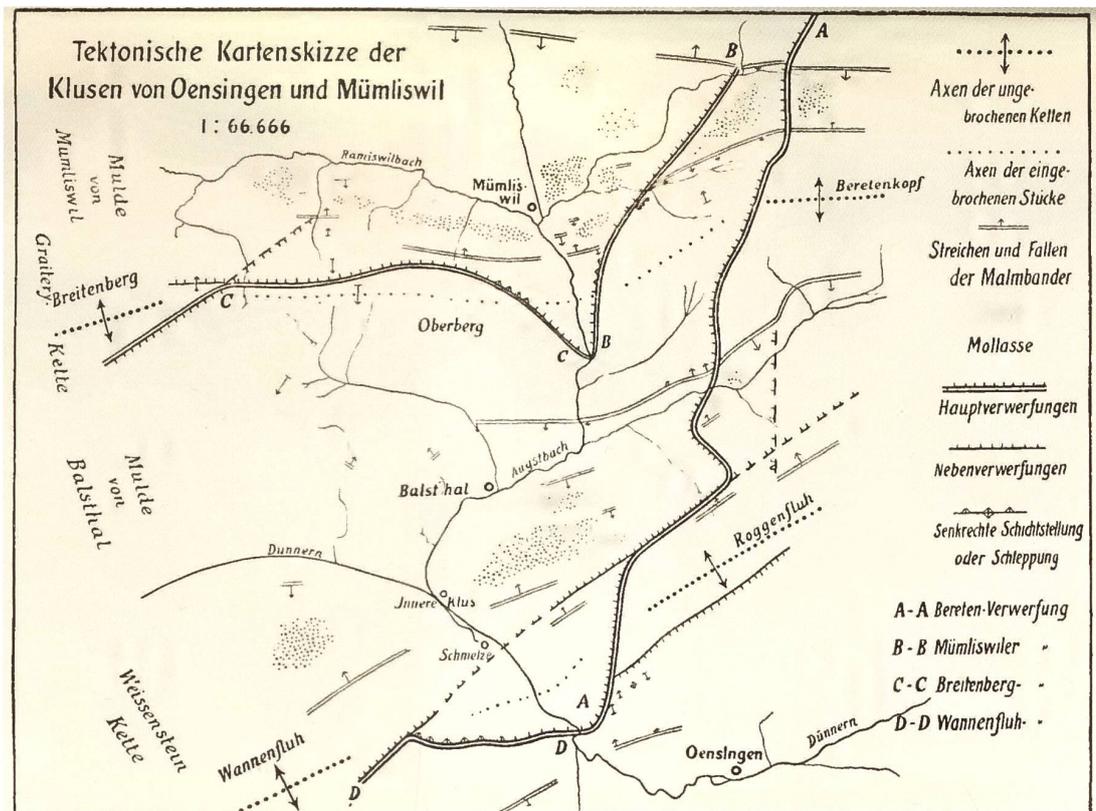


Fig. 52: Carte tectonique extraite de *Zur Tektonik des Nordschweizerischen Kettenjura*. Centralblatt für Mineralogie par G. STEINMANN en 1902.

chevauchantes peuvent même évoluer en formant des klippes comme l'auteur l'avait déjà signalé à l'extrémité de la chaîne des Lägern (MÜHLBERG, 1898). Il souligne que des informations complémentaires seront bientôt disponibles par la publication de la carte géologique de ce secteur qui est en voie de publication (MÜHLBERG, 1901-1903). Cette controverse aurait pu et dû en rester là. Malheureusement, G. Steinmann qui pensait disposer d'arguments sérieux pour imposer certaines de ses vues, et qui soulevait la bonne question de la continuité du Graben du Rhin dans le Jura, décide de poursuivre cette affaire. À cette fin, il engage plusieurs de ses élèves à entreprendre leurs travaux de doctorat dans ce secteur du Jura. Cet important groupe de jeunes géologues allemands, sous la conduite d'un maître vénéré et compétent, va tout naturellement rechercher les

indices et les arguments favorables à ceux proposés par leur patron. Cela sera d'autant plus vrai que les structures proposées par G. Steinmann paraissent être en harmonie avec celles qui sont reconnues sur la bordure du Fossé rhénan et dans la Forêt-Noire, des secteurs proches de leur centre de formation et qui paraissent pouvoir servir de modèle analogique pour assurer la poursuite de leur nouvelle recherche. Comme dans les initiatives de ce type, les résultats seront variables. Wilhelm Delhaes (1883-1916) et Heinrich Gerth (1884-1971), dans leur importante monographie consacrée à la région située entre Reigoldwil et Oensingen (DELHAES & GERTH, 1912), proposent des coupes longitudinales soutenant leur présentation des importants affaissements qu'ils identifient ainsi au centre des cluses dont celle d'Oensingen (fig. 53). Dans cette dernière illustration, on voit

ces quatre traces de failles subverticales qui forment un graben abaissé au centre de la cluse. Toujours parmi les jeunes géologues de G. Steinmann, Hans Cloos (1885-1951) et Serge von Bubnoff (1888-1957) seront des figures marquantes de la nouvelle génération géologique de l'Allemagne sans qu'il soit possible de situer l'impact qu'ont pu avoir ces premières recherches personnelles sur le développement de leur carrière. Placées dans le cadre d'un affrontement parfois assez vif entre la défense des failles proposée par G. Steinmann et celle des chevauchements imprégnant l'œuvre de F. Mühlberg, ces recherches furent parfois marquées par des accents nationalistes qui sont également présents à cette époque dans d'autres relations transfrontalières de ces régions. L'activité géologique a conduit à de très nombreuses publications, dont beaucoup sont des travaux de thèse soutenus à l'Université de Freiburg-im-Breisgau. Avec le recul, la moisson de tant d'efforts paraît assez modeste. Elle a cependant amélioré la connaissance géologique régionale, sans pour autant conduire à l'émergence de concepts nouveaux. H. Cloos en 1910 entreprend, sous la direction du professeur Deecke à l'Université de Freiburg-im-Breisgau, et non pas sous celle du professeur G. Steinmann, une étude de la géologie du Jura bâlois au niveau du passage Jura plissé – Jura tabulaire. Pour Hans-Peter Laubscher (1924-2015) en 2008 ce travail présente des informations encore valables actuellement. Dans cette dernière zone, où les assises du Jurassique plongent légèrement au sud-est et sont surmontées par des dépôts tertiaires faiblement discordants, le régime de failles orientées nord-sud ou NNE-SSW, d'âge oligocène, conduit à la formation d'étroits horsts et grabens d'extension assez limitée qu'A. Buxtorf a étudiés plus au nord. Les reliefs produits au cours de cette structuration ont été nivelés avant que ne se déposent les sédiments du Miocène qui reposent en transgression sur des niveaux variés allant du Jurassique à l'Eocène. Par un schéma de type carte géologique, H. Cloos présente le passage du Jura tabulaire au Jura plissé. Entre ces deux domaines, il souligne la continuité des failles limitant les horsts et les grabens nord-sud, qui ne sont que très peu perturbées dans leur continuité, même si, dans le Jura plissé, les observations ne sont pas

suffisantes pour parvenir à certifier leur présence. La zone chevauchante est divisée en deux domaines : au nord, sa partie frontale est influencée par l'altitude des éléments sur lesquels elle s'avance ; les éléments chevauchants sont partiellement retenus par les zones de horst alors qu'elle s'avance plus librement face aux zones de graben. Au niveau de la zone des écaillés de Muschelkalk, on perd la trace des failles qui apparaissent à nouveau très clairement au-delà, sans qu'il soit possible d'y reconnaître grabens ou fossés. Ce schéma peut être comparé à une carte au 1:50 000 où les failles provenant des études de différents auteurs sont figurées, montrant la régularité de leur disposition dans le Jura tabulaire et leur disposition relativement anarchique dans le Jura plissé.

H. Cloos termine son article en signalant que dans le Jura l'épaisseur des assises engagées dans le plissement peut avoir été l'un des facteurs déterminants pour conduire à différents styles de déformation au niveau de cette couverture. Dans le régime de contrainte lié au déplacement des Alpes, la très forte charge placée sur les séries mésozoïques au niveau de la bordure du Bassin molassique a probablement été le facteur qui a empêché la formation de plis qui n'ont pu se développer que plus au nord, là où l'épaisseur de la couverture devenait plus réduite. Plus au nord encore, l'amincissement de la charge sur la couverture permet d'abord la formation de plis amples puis des déformations marquées par les écaillages avec d'importants chevauchements qui sont présents dans les parties externes du Jura oriental, où la couverture tertiaire est très réduite.

5. 3. Réunion de la Société géologique de France de 1897 (Vosges, Belfort, Porrentruy)

Cette réunion extraordinaire de la S.G.F. essentiellement consacrée à la partie méridionale des Vosges et d'une infime partie du Jura voisin ne joue qu'un rôle mineur dans l'exploration de cette dernière chaîne en dehors de considérations sur la dispersion de l'erratique local, de commentaires sur le bassin carbonifère de Ronchamp, et des

observations sur les formations hercyniennes des Vosges qui pourraient se poursuivre sous la chaîne. On retiendra tout de même que la Société examine les assises jurassiques subtabulaires des environs de Belfort ainsi que des plis que L. Rollier présente près de Bessoncourt, où l'Oligocène concordant sur le Jurassique est redressé à la verticale,

marquant ainsi la limite septentrionale du plissement du Jura dans ce secteur.

Ainsi se termine ce XIX^e siècle qui a vu la naissance de la géologie scientifique et qui s'achève en offrant toutes les données pour enfin proposer une synthèse géologique globale de la formation de la chaîne du Jura.

Chapitre 6

Le passage XIX^e-XX^e siècle : l'époque des grandes synthèses

6. 1. La fin de l'ancienne théorie contractionniste d'Élie de Beaumont

La chaîne du Jura avec sa forme arquée et ses plis qui ne conservent normalement leur direction que sur de courtes distances, n'a été que peu touchée par les propositions de Léonce Élie de Beaumont se rapportant aux analyses des directions présentes dans les chaînes de montagnes (DE BEAUMONT, 1852). On notera tout de même la communication du Français Joseph Fournet; bien que se réclamant d'une certaine filiation avec la théorie des soulèvements de Jules Thurmann, J. Fournet se montre tout de même sensible aux propositions de L. É. de Beaumont permettant de regrouper les Alpes et le Jura dans un même ensemble en raison des mêmes orientations structurales et morphologiques de ces deux provinces (FOURNET, 1859). À cet effet, il indique que la direction des cluses du Jura bernois peut être mise en parallèle avec la direction des chaînes subalpines du Vercors et que

« [...] les dislocations N-S sont encore plus largement exprimées en France, dans les chaînes du Vercors, pays dominé par les longues crêtes de la Moucherolle et des Veymonts. On est donc autorisé à voir entre la masse subalpine de cette partie du Dauphiné et le Jura pareillement subalpin, une transmission continue des mêmes actions et de rattacher par conséquent les fractures des cluses au système du Vercors de M. Élie de Beaumont. » (FOURNET, 1859, p. 256).

« Les perturbations NO-SE [...] sont liées à des effets non moins grandioses. Une large bande, tendue depuis l'intervalle compris entre le lac d'Orta et le lac Majeur, passe au travers des éruptions porphyriques qui longent le versant oriental des Alpes. Remontant le cours de la Toccia, elle atteint les hauteurs du Simplon, puis celles de la Jungfrau. Le lac de Thun s'étend selon son trajet que suivent également l'Aar jusqu'à Berne et la Grande-Emme

jusqu'à Soleure. Elle limite la partie inférieure du lac de Biemme près du débouché du Val de St-Imier, qui s'infléchit dans son sens. La cluse de Moutiers croise obliquement son arête; Le Clos du Doubs s'arrête à son approche. Coupant le Lomont autour d'Asuel, elle file entre Porrentruy et Ferrette [...]. » (FOURNET, 1859, p. 257)

Dans le Jura, la critique des théories de L. É. de Beaumont connaît probablement son apogée peu après la réunion extraordinaire de la Société géologique de France dans le Jura de 1911. Le général Émile Jourdy (1845-1941), absent de cette manifestation à laquelle il aurait voulu assister, tient à faire connaître son point de vue à ce sujet, par les propos qu'il présente à la Société lors de la séance ultérieure à cette excursion. Il rappelle sa publication sur le Jura dolois, (JOURDY, 1872) dans la région de la Serre en soulignant que

« [...] la Société a pu vérifier le fait sur le terrain comme sur la Carte géologique (feuille Besançon), que les orientations des chaînons et des failles consécutives, ne sont pas conformes aux directions systématiques depuis le Trias jusqu'au Miocène; [...] La Société a pu observer [...] qu'en suivant le tracé des reliefs orographiques et des accidents tectoniques depuis les chaînons bathoniens situés au Nord de Dôle jusqu'à Ougney, on voit manifestement leur orientation, quel que soit leur âge, s'infléchir au fur et à mesure qu'on se rapproche de la Serre où ils se fondent dans la grande faille rectiligne qui [...] se courbe pour contourner la pointe nord du massif gneissique. Cette observation est importante, car elle est la première qui ait été présentée pour démontrer l'indépendance de l'âge et de la direction des plissements et des fractures, et par conséquent l'inexactitude de la théorie du Réseau pentagonal qui, suivant l'expression de M. Haug a hypnotisé malheureusement plusieurs générations de géologues. » (JOURDY, 1911, p. 519-520)

6. 2. De grands changements

Dans le dernier quart du XIX^e siècle, l'autrichien Eduard Suess place les déformations de l'ensemble des appendices marginaux de la chaîne alpine que sont les Carpates, l'Apennin et bien entendu le Jura dans le cadre général des déformations alpines (Suess, 1875). Celles-ci, tant sur leur façade septentrionale que méridionale, sont caractérisées par des dislocations issues de forces agissant de la zone axiale en direction de l'extérieur et ne peuvent être en relation avec des masses ignées de la chaîne qui n'ont qu'un comportement passif face à ces manifestations. Les premières décennies du XX^e siècle sont marquées par d'importants changements dans l'approche structurale du Jura, en Suisse principalement. Les recherches associées au percement des tunnels de base du Hauenstein et de Granges-Moutier conduisent, dès 1907, August Buxtorf à proposer que la chaîne du Jura soit une couverture détachée de son socle aplani, plissée et charriée au niveau des évaporites triasiques. Membre influent de la commission géologique suisse dont il sera président de 1926 à 1953, il contribue avec ses élèves au renouveau de la cartographie géologique du Jura où les cartes sont intégrées dans le nouvel Atlas géologique de la Suisse au 1:25 000.

De son côté, Albert Heim publie sa *Geologie der Schweiz* (HEIM, 1919-1922) dont le premier volume est entièrement consacré à la présentation d'une nouvelle synthèse de la partie suisse de la Chaîne, en donnant une grande importance aux déformations de types charriages et décrochements. En 1897, l'arrivée de Hans Schardt à Neuchâtel, en tant que professeur de géologie, conduit au renouveau de la géologie du Jura central, où ce savant se distingue rapidement par la qualité de ses recherches orientées principalement vers la géologie structurale (chevauchements et décrochements) et l'hydrologie (érosion karstique, formation des lacs, aménagements locaux). C'est aussi pour lui l'occasion d'examiner l'origine et la déformation de poches et de filons sédimentaires du Crétacé et de l'Éocène qui ont peut-être fonctionné comme possibles discontinuités de déformations ultérieures. À cette même époque, les activités géologiques dans la région de Bâle connaissent une certaine tension suite aux critiques formulées par G. Steinmann et ses élèves (voir Tectonique, chapitre 5). C'est également

à cette époque que les recherches entreprises par Albrecht Penck (1858-1945) et Eduard Brückner (1862-1927) pour reconnaître la suite des glaciations quaternaires dans le Jura conduisent à des propositions impliquant que la chaîne et sa morphologie ont été affectées par deux phases de plissement dont la plus ancienne aurait, après érosion, conduit à la formation de pénéplaines étendues sur une large partie du Jura (PENCK & BRÜCKNER, 1901-1909). Ces surfaces auraient été ultérieurement déformées lors de la phase principale du plissement de la chaîne. Cette proposition conduit à d'importantes recherches, en France principalement, avec une activité et des prises de position qui s'étendent bien au-delà de la seconde guerre mondiale.

6. 3. Albert Heim (1849-1937)

En Suisse, le comportement des calcaires face à la déformation a surtout été marqué par les études de A. Heim. Deux décennies après les propositions de J. Thurmann, A. Heim évoque le comportement ductile des calcaires dans les nappes helvétiques et dans les Massifs externes des Alpes (HEIM, 1878, 1915).

Dans le Jura, en dehors des investigations peu concluantes de J. Thurmann, on s'est d'abord intéressé à présenter la variété géométrique des voûtes; on y a précisé la géométrie des différents groupes d'assises participant à ces édifices, en admettant implicitement que les assises calcaires possédaient une certaine capacité à se ployer à la faveur des glissements de couche à couche, sans présenter de fractures trop importantes en dehors des zones de charriages. Dans son ouvrage sur les mécanismes de la déformation des roches alpines, A. Heim montre par de multiples exemples que les roches calcaires soumises à la déformation présentent une grande rigidité entraînant des fractures qui conduisent à la formation de blocs anguleux (HEIM, 1878); ceux-ci sont d'abord dégagés par l'altération puis entraînés par les eaux, subissant alors les effets de l'érosion abrasive du transport par les torrents qui les transforme en galets de plus en plus arrondis. Dans le cadre de déformations placées dans un régime associé à un accroissement des contraintes, les calcaires deviennent insensiblement plastiques. Des comportements semblables

sont reconnus pour d'autres pétrographies et montrent l'évolution du comportement mécanique des roches face aux effets de la pression et de la température principalement. Dans le Jura, les calcaires se distinguent par un comportement essentiellement rigide avec le développement de cassures; les galets calcaires des assises conglomératiques polygéniques (*Nagelfluh*), présentent souvent des marques de dissolution sous les effets de la pression alors que certains galets calcaires présentent des aplatissements. Ces faits montrent que la déformation des calcaires du Jura n'est pas uniquement rigide.

Suite aux critiques des milieux politiques et de la presse, qui s'interrogent sur la compétence des géologues engagés dans le cadre du grand chantier du percement du tunnel du Simplon au début du xx^e siècle, A. Heim fournit un ensemble de commentaires destinés à éclairer le public sur les difficultés rencontrées lors des grands travaux et fait part de sa compétence dans ce type d'investigation demandant science et conscience (HEIM, 1904). À cette occasion, il fait état des succès remportés lors du percement des tunnels traversant le Jura. Ses commentaires ne sont pas du goût de Carl Schmidt qui juge que cet article apologétique ne souligne pas assez les difficultés rencontrées par le géologue qui se voit chargé de responsabilités, mais auquel on refuse de mettre à sa disposition les moyens nécessaires à sa tâche (SCHMIDT, 1902-1904); une situation trop souvent réalisée, comme on le constate dans le cas du Simplon où les recherches géologiques et l'établissement d'une carte géologique furent placés comme derniers points du programme de travail.

Avant la sortie de presse de son premier tome de *Geologie der Schweiz*, A. Heim présente en 1915, à Genève lors de l'assemblée de la Société helvétique des sciences naturelles, une conférence essentiellement orientée vers les aspects structuraux de la chaîne du Jura (HEIM, 1915). Ce travail s'ouvre par la présentation d'une carte schématique de l'ensemble de la chaîne où sont situés les plis, leur importance relative, ainsi que les grands décrochements qui les affectent. Ce remarquable document restera un modèle (fig. 54); il sera souvent repris, légèrement modifié pour y inclure des données des travaux récents qui n'en changeront pas l'esprit. Dans la première partie de sa conférence,

A. Heim rend hommage aux importantes contributions apportées depuis peu par A. Buxtorf en saluant sa proposition de considérer le Jura comme une couverture sédimentaire décollée au niveau des assises plastiques des sels du Trias. Il tient aussi à montrer que des décollements de moindre ampleur sont également présents à l'intérieur de la pile sédimentaire, principalement là où des assises marneuses ou évaporitiques se trouvent associées à des calcaires massifs. Ainsi dans les situations rencontrées au cœur des anticlinaux, les niveaux argileux de l'Argovien, du Keuper et du Muschelkalk conduisent à des glissements et à des décollements locaux, entraînant la formation de plis disharmoniques qui s'enracinent dans ces niveaux plastiques et conduisent par accentuation à la déformation de plis ordinaires, à des plis-failles, puis des chevauchements. Dans cette évolution, l'épaisseur des couches du flanc inverse diminue progressivement pour n'être finalement représentée que par un plan de chevauchement et son charriage. Celui-ci ne marque que l'aboutissement de l'évolution des plis auxquels ils sont associés dans le temps et l'espace. A. Heim juge que tous les charriages, petits et grands, résultent de l'évolution de ce type. Avec des assises stratifiées comme le sont celles du Jura, il refuse l'idée de la formation d'un cisaillement oblique aux couches, comme A. Buxtorf le propose. Il maintiendra cette position tout au long de sa vie.

Dans ce même travail de 1915, A. Heim aborde également les décrochements de la chaîne, en les associant à des marques de l'extension longitudinale de l'arc de la chaîne. A. Heim termine sa présentation du Jura par quelques remarques touchant les relations existant entre les Alpes et le Jura. Cette dernière chaîne n'étant qu'une petite branche superficielle du grand ensemble, cent fois plus modeste que l'ensemble alpin; elle a été poussée et déplacée de 8 à 17 km en direction du nord-ouest et a déjà perdu, au cours des temps, par érosion, la moitié de son volume situé au-dessus du niveau de la mer; elle a néanmoins gardé, bien mieux que les Alpes, les traces de ses structures internes. Aujourd'hui, ces deux chaînes ne sont que les ruines de ce que fut leur grandeur.

Le premier volume de *Geologie der Schweiz* (HEIM, 1919) devient rapidement, par ses apports novateurs et son regard historique, l'ouvrage de

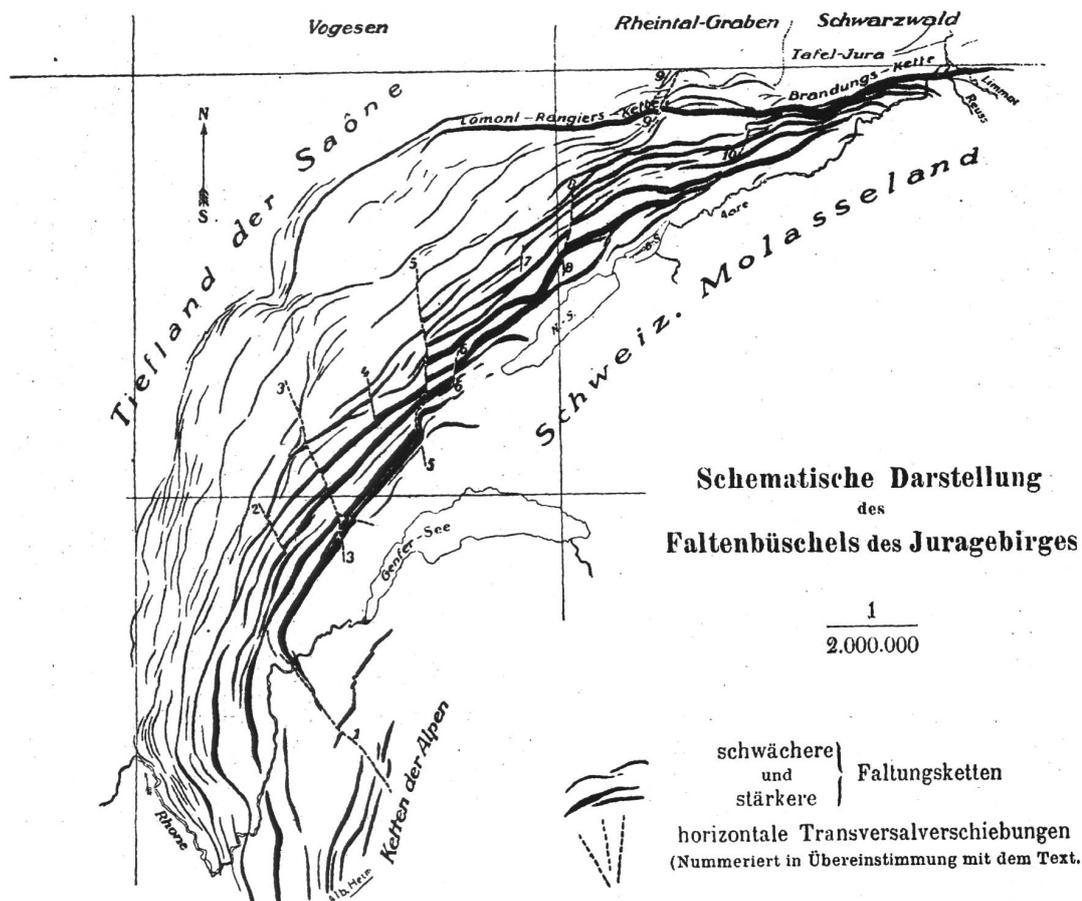


Fig. 54: Carte schématique de l'ensemble de la chaîne montrant les grands décrochements et l'importance relative des plis, extraite de *Vermehrtes Licht in der Juraforschung* par Albert Heim en 1915. Les failles numérotées sont: 1. Vuache; 2. Saint-Claude; 3. Morez; 4. Mouthe; 5. Pontarlier; 6. Suchet; 7. La Tourne; 8. La Ferrière; 9. La Caquerelle; 10. Faille de Gänsbrunnen.

référence incontournable de l'étude de la partie interne du Jura, tout particulièrement dans les domaines de l'analyse structurale et de la morphologie. Publié en Allemagne, au sortir de la grande guerre, il fait l'objet de virulentes attaques d'Emmanuel de Margerie qui interprète le lieu de cette parution comme un manque de neutralité de la part de son auteur (DE MARGERIE, 1922). Cette attitude critique a probablement contribué à détourner certains géologues français de ce texte qui, rédigé en allemand, n'avait déjà pas les faveurs d'un public qui subissait les effets de la barrière linguistique

et qui surtout se montrait hostile aux travaux germaniques en représailles de la guerre 1914-18. Cela limita les échanges entre deux communautés scientifiques, abordant pourtant le même problème.

La synthèse du Jura suisse présentée dans *Geologie der Schweiz* est remarquable par la richesse de l'information et par l'abondance de l'illustration: plus de trente figures pour la seule partie tectonique, sans compter les quinze grandes coupes structurales transversales de la chaîne à l'échelle 1:75 000, depuis le Jura oriental (Lägern) jusqu'au profil s'étendant du

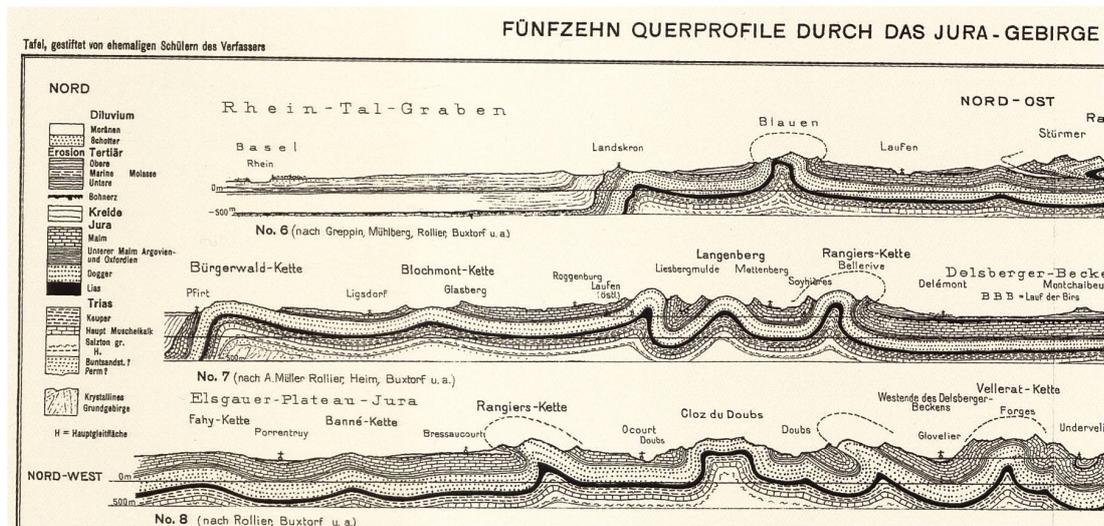


Fig. 55 : Extrait des 15 grandes coupes structurales transversales de la chaîne à l'échelle 1:75 000, depuis le Jura oriental (Lägern) jusqu'au profil s'étendant du Salève à la vallée de Montréal en France. *Geologie der Schweiz*, Albert HEIM, 1919-22.

Salève à la vallée de Montréal en France. En direction de la profondeur, les couches du Lias sont bien représentées; elles surmontent celles du Keuper et du Muschelkalk vaguement suggérées en dehors de la zone du Jura tabulaire où figurent même les grès de base du Trias et le socle (fig. 55). L'auteur situe la base des couches mésozoïques à un niveau assez régulièrement voisin de -500 m dans une situation qui se trouve présente dans une large partie suisse de la chaîne. Au niveau des détails, les plis des coupes présentées par A. Heim sont marqués par une assez grande continuité de la plupart des différentes strates repères. Il souligne ainsi l'aspect souple des plis. Cette souplesse géométrique donnée à l'ensemble des structures profondes est assez semblable à celle que l'auteur avait observée dans les niveaux profonds et figurée au cours de ses recherches antérieures effectuées dans le domaine alpin, où la déformation des calcaires montre une continuité et une rondeur plus largement présente. On doit également signaler que de nombreux profils présentés par A. Heim proviennent d'emprunts des travaux de A. Buxtorf, Alfred Amsler (1870-1940), F. Mühlberg, H. Schardt, J. Favre et d'autres probablement.

Le travail de A. Heim a permis une schématisation claire de la morphologie du Jura tabulaire (fig. 56) soulignant la suite de trois plateaux formés par les calcaires massifs (Muschelkalk, Dogger et Malm) surmontés par des séries tertiaires localement conglomératiques, qui se suivent en allant de la région de la Forêt-Noire, en direction du Jura plissé.

Ces unités sont mises en valeur dans les zones facilement dégagées par l'érosion que sont les niveaux évaporitiques du Muschelkalk, du Keuper, des assises marneuses du Dogger inférieur et finalement de la base du Jurassique supérieur oxfordien et argovien. Elle a aussi permis la mise au point de la chronologie du Jura tabulaire, illustrée ici par une présentation postérieure (fig. 57, BUXTORF, 1934), et a apporté des précisions dans la reconnaissance des structures chevauchantes du Jura oriental liées aux travaux remarquables de F. Mühlberg qui étaient souvent présentés lors d'excursions organisées dans cette partie de la chaîne; comme par exemple, la magnifique planche de profils qu'il présente à la fin de sa vie pour illustrer la zone des grands charriages (MÜHLBERG, 1915).

Un étudiant de A. Heim, Edward Blösch (1884-1980), examina la disposition des failles de

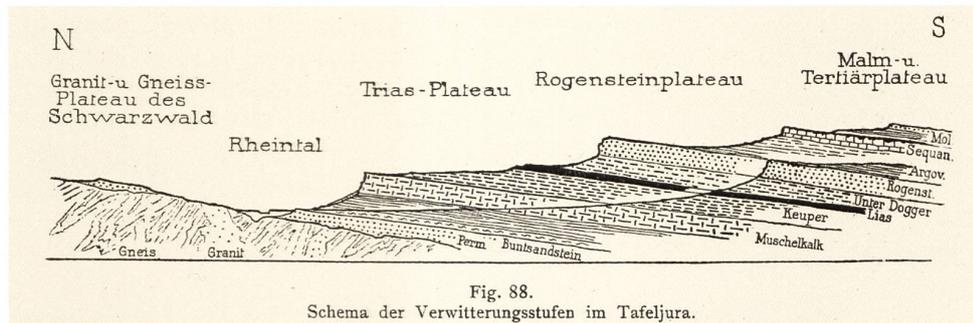


Fig. 56 : Morphologie du Jura tabulaire soulignant la suite de trois plateaux formés par les calcaires massifs du Muschelkalk, du Dogger et du Malm. Extrait de *Geologie der Schweiz*, Albert Heim, 1919-22.

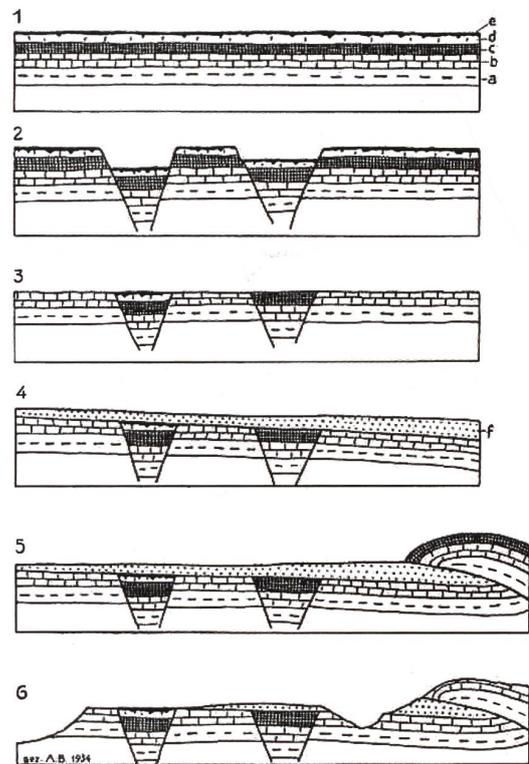


Fig. 57 : Chronologie du Jura tabulaire extraite de *Geologischer Führer der Schweiz - Basler Tafeljura* de A. Buxtorf en 1934. Histoire géologique du Jura tabulaire bâlois à partir de l'Éocène (représentation schématique des principaux événements). a = Dogger inférieur ; b = Dogger moyen et supérieur ; c = Malm inférieur ; d = Malm moyen ; e = Eocène (Sidérolithique) ; f = Helvétien-Tortonien.
1- État *Eocène-Oligocène* (l'Oligocène n'a probablement pas été déposé ici).
2- À l'Oligocène supérieur, naissance de failles normales (principalement fossés en forme de coins) en relation avec importante formation de fractures dans le Fossé rhénan.
3- *Oligocène supérieur- Miocène inférieur* : aplanissement du relief de fractures sous forme de pénéplaine, puis légère inclinaison du Jura tabulaire vers le sud (soulèvement de la Forêt-Noire).
4- *Transgression helvétique* (à partir du sud) sur surface d'abrasion marine (pénéplaine égalisée) ; sédimentation de l'Helvétien-Tortonien du sud vers le nord («Juranagelfluh», Poudingues jurassiens).
5- *Plissement* (et chevauchement) *du Jura plissé, fin du Tortonien et Pliocène inférieur* (anté- et post-pontien).
6- Pendant le *Pliocène supérieur* et le *Quaternaire*, soulèvement régional et formation des vallées actuelles.

l'ensemble du Jura tabulaire présentes sur le territoire suisse situé au sud du Rhin depuis la région de Bâle jusqu'à la coupure nord-sud de la vallée de l'Aar (BLÖSCH, 1910).

La fracturation de ce large secteur, limité au nord par la Forêt-Noire est fortement marquée par la prolongation des cassures présentes dans cet ensemble cristallin alors qu'à son extrémité nord-ouest se marque l'influence de la bordure du Fossé rhénan.

Le Jura tabulaire, situé dans la région de Liestal, où aboutissent les grandes failles limitant vers l'est la zone du Dinkelberg de la Forêt-Noire, est l'objet d'une étude particulièrement attentive. L'auteur y observe un réseau de cassures orientées NNE-SSW conduisant à la formation d'une suite de fossés et de horsts, parallèles. Plus à l'est, au-delà de la vallée du Frickthal, E. Blösch signale deux cassures importantes, la faille de Mandach et celle de Mettau qui divergent en direction de la vallée de l'Aar et abaissent le secteur qu'elles encadrent de plus de 100 m.

Pour lui, les réseaux de failles du Jura tabulaire nord-sud et celles d'orientation NE-SW de la région de Sissach se sont développés dès l'Oligocène moyen en relation avec le début du développement du Fossé rhénan. Une seconde phase de déformation de ces accidents paraît avoir été active à la fin du Miocène, accompagnée par des failles est-ouest. Toutes ces cassures paraissent être liées à un système de tension lié à des bombements locaux. Les différents auteurs s'accordent pour considérer que les grabens forment des coins par convergence des failles les limitant et se transforment au niveau du socle en failles que S. Bubnoff a observé dans la continuation du Jura tabulaire dans la partie sud de la Forêt-Noire (VON BUBNOFF, 1912). Lukas Hauber (1931-2019) a présenté une étude moderne des jeux des failles du Jura tabulaire bâlois au front du Jura plissé, illustrant par une suite de profils les légères ondulations qui se marquent au front de la zone des charriages alors que les horsts et les grabens, larges de 500 m à 1 km avec des effondrements se situant entre 50 m et 250 m pour les plus profonds (HAUBER, 1960). L'article synthétique sur le Jura de A. Heim puis la publication de son ouvrage *Geologie des Schweiz, Bd. 1, Molasseland und Juragebirge* (HEIM, 1919) marque sur le plan suisse une étape fondamentale

dans l'histoire de l'analyse des structures de la chaîne. La théorie du charriage de la couverture est établie, les grands décrochements sont identifiés, les relations entre le Jura plissé et l'ensemble Fossé rhénan, massifs des Vosges et Forêt-Noire sont abordés, les propositions de pénéplaines sont lancées. Après cette publication majeure, on assiste à l'exploitation des nouvelles théories qui viennent d'être lancées pour les confronter avec les faits recueillis dans les études régionales. Le découpage de la couverture par les décrochements, par les charriages surtout, est largement accepté alors que l'importance de la disharmonie entre les assises calcaires rigides et les niveaux marneux ou évaporitiques déjà reconnue devient une des préoccupations de la recherche.

6. 4. Hans Schardt (1858-1931)

À Neuchâtel, sur la bordure du Bassin molassique, la Haute-Chaîne, ici en position centrale, est longtemps considérée comme une couverture ondulée et continue, sans redoublement et sans grande discontinuité (De MONTMOLLIN, 1839; DESOR & GRESSLY, 1859; JACCARD, 1869). Lors de l'excursion du Congrès international de géologie de 1894, A. Jaccard en donne encore une telle image dans l'illustration remise aux congressistes (fig. 58), contrairement au document fourni par L. du Pasquier (voir Tectonique, chapitre 5).

Après la disparition prématurée de L. du Pasquier, H. Schardt reprend ce nouveau regard structural en l'amplifiant. Entre 1900 et 1910, il publie huit notes de ses *Mélanges géologiques sur le Jura neuchâtelois et les régions limitrophes* (SCHARDT, 1900-1910), où il souligne que le Jura central est découpé par de nombreux pli-failles, des décrochements et des chevauchements, donnant à cet ensemble un aspect bien moins continu qui est encore souligné par la disharmonie des plis. Toutes ces notes sont accompagnées de croquis cartographiques, de profils d'excellente facture soulignant l'importance des accidents cassants (fig. 59).

À ces contributions encore mineures sur le plan régional mais substantielles par l'analyse structurale et paléontologique, s'ajoute: *La description géologique de la région des Gorges de l'Areuse* (SCHARDT & DUBOIS, 1902) qu'il signe avec Auguste Dubois (1862-1923).

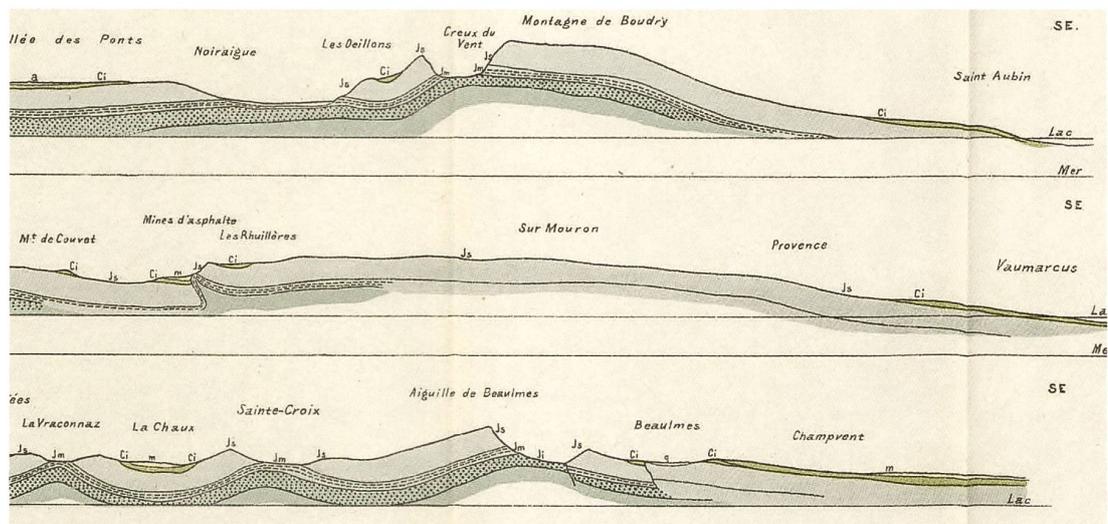


Fig. 58 : La Haute-Chaîne. Profils extraits des documents fournis pour l'excursion du Congrès international de géologie de 1894 par A. JACCARD et publiés dans le livret-guide géologique d'excursions dans le Jura et les Alpes de la Suisse, 1894.

Peu avant, celui-ci avait publié sa monographie *Les Gorges de l'Areuse et le Creux du Van* (DUBOIS, 1902) contenant un aperçu géologique de près de 30 pages qui accompagne des contributions se rapportant à la flore et à la faune et à son développement lié à l'établissement de la voie ferrée puis des installations hydroélectriques. Cet important texte permet de prendre contact avec la stratigraphie régionale, ainsi qu'avec les particularités structurales du Jura central, marqué par ses nombreux charriages, la disharmonie des structures profondes du Dogger comparées à celles plus simples du Malm, ainsi que les complications extrêmes des assises du Crétacé placées le long des plans de chevauchements. Dans les travaux que H. Schardt consacre à la géologie du Val de Travers et des gorges de l'Areuse, (SCHARDT & DUBOIS, 1902; SCHARDT, 1900-1910, tome 33), l'auteur dessine, à plusieurs reprises, des plis isoclinaux serrés qui surmontent les marnes hauteriviennes au-delà desquelles ces accidents disparaissent, montrant ainsi la présence d'un décollement au-dessus de ce niveau argileux. Il est même étonnant de constater que H. Schardt, ce tectonicien averti, ne profite pas de cette occasion pour commenter les raisons permettant ce type de structure.

Bien plus tard, la région des gorges de l'Areuse fera l'objet de deux publications par Jean Meia (né

en 1935) et par Jean-Paul Schaer (1928-2021), visant la présentation didactique de ce secteur de la bordure interne du Jura central (MEIA, 1986; SCHAEER *et al.*, 1998).

H. Schardt s'est distingué par son activité de collaborateur du *Dictionnaire géographique de la Suisse* (1902-1910); il y présente les structures rencontrées dans différentes parties des cantons de Neuchâtel et de Vaud. Dans ce dernier, il montre que la large zone synclinale de la vallée de Joux (Jura vaudois) est bordée sur ses deux flancs par les importants anticlinaux que sont, au nord le Mont Risoux et au sud le Mont Tendre, qui se font face en s'avancant tous deux par charriage sur la zone synclinale. Par comparaison avec les illustrations anciennes de L. Rollier et de A. Jaccard, cette contribution présente une nouvelle approche du style tectonique régional. Alors que les illustrations de L. Rollier, comme celles qui accompagnent l'excursion III du Congrès de Zürich (LIVRET-GUIDE, 1894, p. 19-30, pl. III), restent fidèles à la présentation des caractères morphologiques proposés par J. Thurmann, elles font ressortir la quasi-continuité des assises, dont les couches régulières sont le plus souvent faiblement inclinées, formant ainsi des plis symétriques, dont les horizons sont régulièrement emboîtés. La présentation du même secteur par H. Schardt (fig. 60,

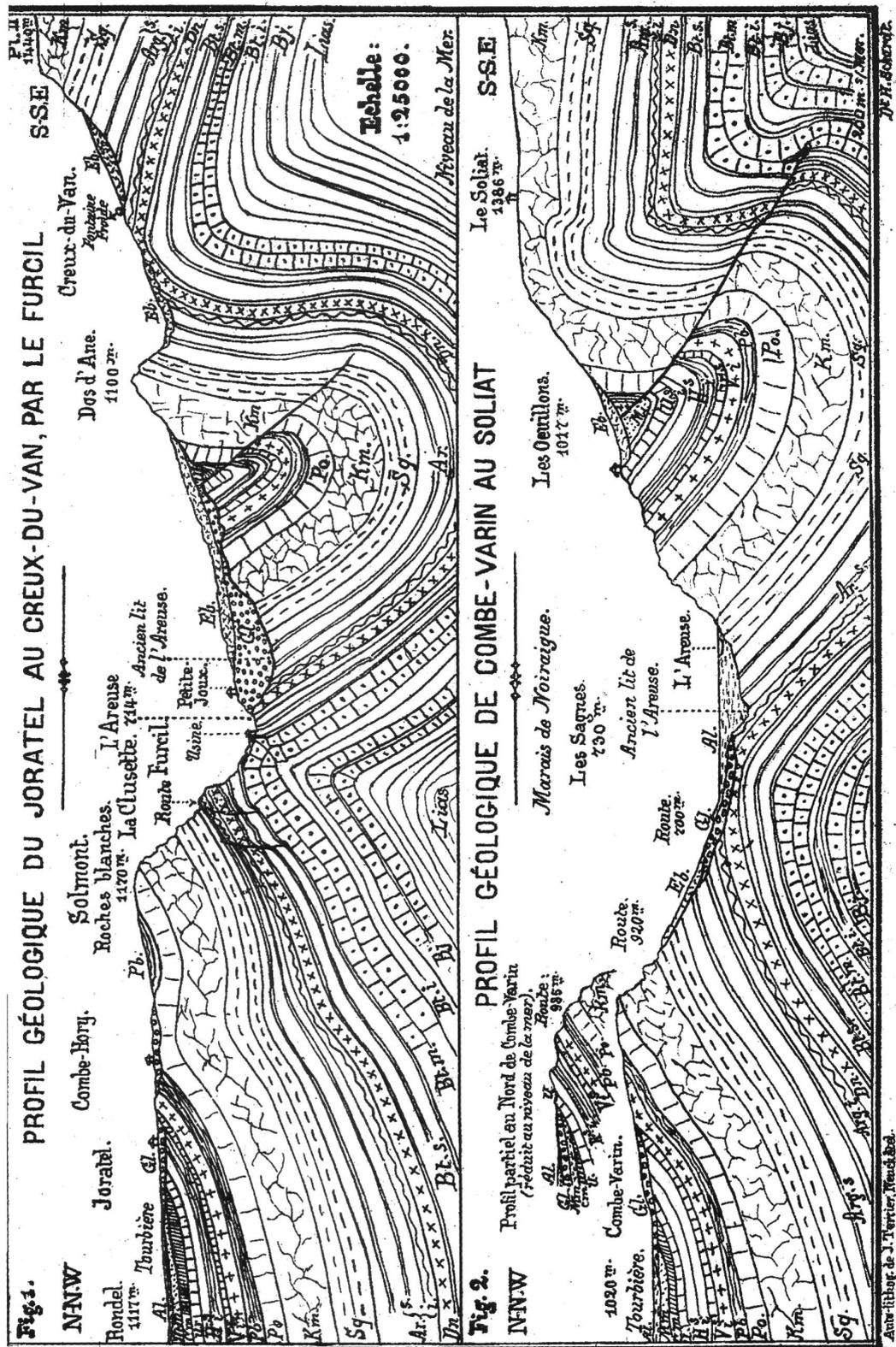


Fig. 59 : Profils géologiques du Joratel au Creux-du-Van et de Combe-Varin au Solliat extraits des Mélanges géologiques de Hans SCHARDT publiés en 1900.

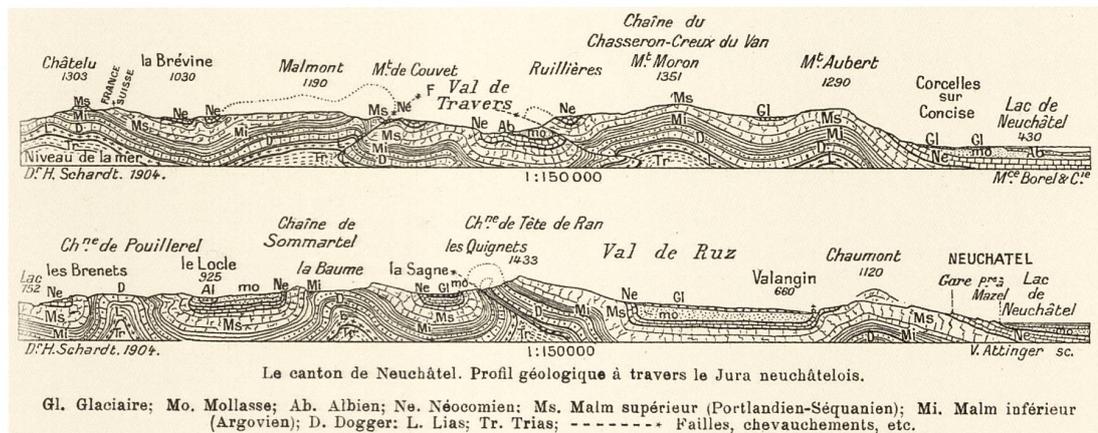


Fig. 60 : Profils géologiques à travers le Jura neuchâtelois par H. SCHARDT extraits du *Dictionnaire géographique de la Suisse*, 1902-1910, tome III p. 471.

Dictionnaire géographique de la Suisse, 1902-1910) montre des plis régulièrement déjetés, souvent chevauchants, localement marqués de disharmonies internes et de genoux, qui donnent une nouvelle vision des structures qui vont s'imposer à celles encore imprégnées de l'héritage de J. Thurmann. On constate que les images simplificatrices des premières recherches restent très vivantes et guident souvent les visions de nombreux chercheurs qui se laissent plus facilement guider par ces images anciennes que par une analyse attentive et précise des données de terrain.

En 1906, lors de l'assemblée de la Société helvétique des sciences naturelles à Saint-Gall, H. Schardt présente un exposé sur « *Die modernen Anschauungen über den Bau und die Entstehung des Alpengebirges (Les vues modernes de la tectonique et l'origine de la chaîne des Alpes)* ». Ce travail fait l'objet d'une publication comportant une carte géotectonique de la Suisse accompagnée de trois profils géologiques dont deux traversent le Jura (SCHARDT, 1906b). Dans ceux-ci, la géométrie des plis s'atténue en profondeur par disharmonie au niveau des assises du Permien et du Carbonifère; la surface supérieure du cristallin est présentée comme étant peu accidentée; quelques aspérités peu marquées s'y rencontrent pourtant, et sont placées directement sous les reliefs majeurs de la chaîne, comme au Weissenstein et au Chasseron; dans ce dernier cas, H. Schardt figure une légère dépression du socle

au nord de ce dernier relief, dans une position correspondant au Val de Travers, synclinal affecté par deux chevauchements qui se font face. Deux années plus tard, en 1908, lors de la réunion de la Société géologique suisse à Glaris, H. Schardt commente ses deux anciens profils à travers le Jura, en publiant une courte note « [...] pour montrer la structure profonde de cette chaîne. ». Il fait remarquer que

« [...] le plissement des terrains sédimentaires qui édifie la chaîne du Jura, ne peut aller plus profond que le Trias, soit le groupe de l'anhydrite; la puissante assise du grès bigarré (si elle existe dans le Jura méridional) ne peut guère avoir participé au plissement. Les plis-failles et les chevauchements qui existent autant dans le Jura méridional que dans le Jura septentrional, sont particulièrement démonstratifs dans ce sens. Les imbrications que M. Mühlberg a constatées dans le Muschelkalk, doivent s'être développées sans participation du grès bigarré, peut-être seulement après déblaiement par érosion du Dogger et du Malm [...] M. Buxtorf a récemment exprimé une hypothèse analogue en admettant une poussée venant des Alpes comme cause de ces dislocations du Jura. Il admet même un plan de glissement au-dessous du Trias moyen, et représente le Jura comme une nappe de glissement plissée (gefaltete Abscherungsdecke). Il serait plus juste de parler d'une zone de glissement. Il est en effet peu probable que la poussée venant des Alpes

ait produit un glissement sur un plan déterminé; mais ce sont certainement les couches marneuses dans leur ensemble qui ont servi de lits mobiles en se déformant dans toute leur masse. L'auteur a déjà eu cette impression, lors de la publication de sa note sur la chaîne du Reculet et du Vuache, en 1890, et l'année d'après, lorsqu'il mit en relation les chevauchements du Jura bernois et soleurois avec le recouvrement des Préalpes. Les décrochements du Mont Salève sont particulièrement démonstratifs à cet égard.» (SCHARDT, 1908).

Cette note et ses commentaires paraissent être l'expression du profond regret que l'auteur éprouve à n'avoir pas été le premier à proposer le décollement de la couverture du Jura, alors qu'antérieurement il avait su reconnaître que le charriage des Préalpes était directement associé à la présence des séries évaporitiques du Trias.

En 1911, la nomination de H. Schardt comme professeur à l'École polytechnique de Zürich le conduit à abandonner son enseignement et ses recherches dans le Jura neuchâtelois et dans le Jura en général. Cette nouvelle charge et engagement scientifique dans les Alpes, où il est expert pour la construction du tunnel du Simplon, limitent ses disponibilités pour rester actif dans le Jura dont il ne présentera jamais la synthèse espérée. Ayant été le premier à proposer que le charriage des Préalpes soit associé à la présence d'un coussin évaporitique triasique, il est assez étonnant qu'il n'ait pas songé à reprendre cette idée pour rendre compte des particularités structurales du Jura. Trop absorbé par les multiples tâches qu'il poursuit, il se trouve pris de vitesse par les connaissances et l'imagination de August Buxtorf dont les activités d'expert, d'enseignant et de chercheur paraissent avoir été, au cours de ces années, tout aussi lourdes et absorbantes que celles qui occupaient H. Schardt. Quelques années avant sa mort et dans une de ses dernières publications, H. Schardt évoque la formation des « accidents nommés à tort "décrochements" transversaux, tel l'accident entre St. Cergue – les Rousses-Morez (Col de St. Cergue), celui de Vallorbe-Pontarlier et le remarquable "décrochement" allant de Tête de Ran, au NW du Val de Ruz, à la Combe de la Ferrière [...] » (SCHARDT, 1920, p. 120). Il indique comme origine de ces grandes cassures des anciens cours d'eau *éopliocéniques* qui ont formé des tranchées avant le plissement du Jura. Pour H. Schardt,

« [...] le sillon qui a déterminé le col de St. Cergue correspond à un cours d'eau débouchant des Alpes sur le tracé de l'Arve d'aujourd'hui; celui de Vallorbe-Pontarlier aurait comme origine un Rhône primitif; enfin, la trouée de Tête de Ran – Convers – Cernier des Aigues se trouve presque exactement sur l'alignement de la vallée transversale de l'Aar au sortir des Alpes. ».

Cette note est surprenante... Néanmoins, cette théorie des *cours d'eau originels* sera reprise quelques années plus tard par Daniel Aubert (1905-1991) en 1953 évoquant le décrochement de Pontarlier :

« Cette étude nous amène à une conclusion pour le moins imprévue, c'est que le décrochement de Vallorbe-Pontarlier n'en est pas un au sens strict du terme. De quoi s'agit-il en effet? D'une ancienne cassure transversale, affectant la couverture sédimentaire et vraisemblablement le socle cristallin, analogue aux failles oligocènes qui jalonnent le bord externe de la chaîne. À son extrémité méridionale, apparaît une seconde cassure parallèle à la première, et entre les deux, un fossé d'effondrement. »

Qu'en est-il aujourd'hui de cette idée? Laissons la parole au géologue Vincent Bichet (né en 1963) de Besançon :

« Les décrochements jurassiens sont bien des décrochements tectoniques, syn- ou post-plissement. Cette théorie des cours d'eau a fait long feu assez rapidement. La note d'Aubert est fondée sur le fait qu'il s'étonne de voir des structures d'effondrement dans une tectonique considérée comme compressive. Il appuie sa démonstration sur la partie sud du décrochement de Pontarlier et la région de Vallorbe. À l'époque la mécanique de ces failles décrochantes était assez mal connue et la notion de zones en pull-apart dans ces structures transformantes pas encore bien comprise. Les études récentes¹ ont grandement amélioré notre connaissance et confirment toutes que ces décrochements sont synchrones de la déformation. Localement leurs tracés peuvent dégager

¹ Voir les thèses de Anna SOMMARUGA, 1997; de Catherine HOMBERG, 1997 et de Mickael RABIN, 2016, ainsi que les publications de David HINDLE *et al.*, 2000, Thomas AFFOLTER et Jean-Pierre GRATIER, 2004, entre autres.

des systèmes de pull-apart qui permettent des mécanismes de déformation plutôt distensifs. Reste que la question de leur relation avec d'éventuelles failles de socle n'est pas réglée.» (BICHET, 2019, communication orale)

6. 5. August Buxtorf (1877–1969)

6. 5. 1. Couverture décollée

À la fin de la première décennie du xx^e siècle, A. Buxtorf présente une toute nouvelle façon de concevoir la structure globale de la chaîne du Jura. (BUXTORF, 1907, 1908). L'auteur qui à cette époque est tout juste âgé de trente ans, vient d'être nommé professeur ordinaire de géologie à l'Université de Bâle. Comme géologue, il s'est déjà illustré par ses travaux dans le domaine helvétique alpin de la région du Lac des Quatre Cantons ainsi que par d'importants travaux stratigraphiques dans le Jura tabulaire bâlois. Il est alors fort actif dans les travaux associés au percement des tunnels ferroviaires traversant le Jura, au sud de la région bâloise.

Le fascicule remis aux participants de l'excursion de la Société allemande de géologie (*Deutsche Geologische Gesellschaft*) organisée par C. Schmidt à travers la Suisse, contient quatre profils à travers le Jura septentrional, signés par A. Buxtorf qu'il republiera un an plus tard (SCHMIDT *et al.*, 1907). Pour la première fois, la chaîne du Jura y est présentée comme une couverture plissée et charriée au niveau des évaporites du Trias. Plusieurs éléments structuraux essentiels à cette hypothèse y sont présentés par des figures, mais la justification de cette proposition ne fait encore l'objet d'aucun développement.

J. Thurmann avait utilisé le contraste entre l'érosion et l'altération des niveaux calcaires et marneux pour souligner le rôle morphologique très différent de ces deux groupes de roches dans le paysage du Jura, où les premiers forment des crêts alors que les seconds sont responsables des combes. Par la suite, plusieurs géologues s'attachent à préciser le comportement structural fort différent de ces deux types de roches. Dans son analyse des structures rencontrées dans la région du Clos du Doubs en 1909, A. Buxtorf montre tout d'abord que les structures de ce secteur attestent des déformations plus conséquentes

que celles décrites par J. Thurmann et surtout par L. Rollier (BUXTORF, 1909); à la place d'ondulations douces présentées par ce dernier, A. Buxtorf indique que les flancs des anticlinaux sont marqués par des assises verticales pouvant être même renversées, avec chevauchement sur la zone synclinale voisine; des structures de ce type, présentes surtout sur les flancs nord-ouest des accidents avec des assises renversées, se rencontrent également mais plus rarement sur les autres flancs des anticlinaux; elles sont alors qualifiées de rétrocharriages. Dans la région du Weissenstein, on y note des relais d'anticlinaux; au-dessous des larges voûtes calcaires, le dessin des niveaux argileux et marneux présente souvent, par fluage de la matière, une indépendance par rapport à celui de leur enveloppe, conduisant à des discordances sensibles entre les formes superficielles et celles de la profondeur; au niveau des flancs de ces structures, ces situations sont localement le siège de charriages qui peuvent évoluer dans le décoiffement des assises du Jurassique supérieur qui viennent reposer sur les sédiments tertiaires des zones synclinales.

Ces données fondamentales sont principalement présentées dans deux publications ultérieures (BUXTORF, 1908, 1917), où l'auteur s'appuie sur quatre arguments majeurs pour justifier que le Jura est une couverture plissée, détachée de son socle au niveau des évaporites:

- 1) La chaîne plissée se distingue par une absence totale d'affleurements de sédiments antérieurs au Muschelkalk.
- 2) Dans le cœur des anticlinaux et dans les zones de charriages, les roches plus anciennes que le Muschelkalk sont totalement absentes.
- 3) Au cœur des plis, la disposition géométrique des assises emboîtées ne permet pas d'y placer des assises plus anciennes que le Muschelkalk.
- 4) Les meilleurs profils qui ont été dessinés dans la chaîne font admettre que celle-ci est située au-dessus d'un socle dont la surface n'est que très peu accidentée.

1 – Dans le Jura plissé, pas de roches antérieures au Muschelkalk

Dans les régions de la Forêt-Noire, les roches du Muschelkalk reposent régulièrement sur les assises

gréseuses et conglomératiques rapportées aux grès bigarrés du Trias inférieur dont la base, en certains endroits, passe à des grès du Permien ou, plus rarement, à des formations argileuses du Carbonifère. Au contraire de cette situation, dans le Jura plissé, où le groupe de l'anhydrite est largement affleurant, sur une distance ouest-est voisine de 50 km, ces roches ne sont jamais accompagnées par des affleurements de roches plus anciennes. Alors qu'Amanz Gressly pensait que les grès bigarrés seraient présents aussi bien à l'intérieur du tunnel du Bözberg qu'au niveau du portail septentrional, F. Mühlberg a souligné qu'au cours du percement, ces prévisions se sont révélées erronées (MÜHLBERG, 1889a). Dans les zones d'intenses déformations du Jura oriental, le groupe de l'anhydrite, la formation la plus ancienne présente, est si largement affleurante que personne ne pense que ce fait pourrait être un phénomène accidentel.

2 – Pas de roches antérieures dans les zones de charriages

Dans le Jura oriental, les importants plans de charriage ne comportent jamais de roches plus anciennes que celles du Muschelkalk. Ces dernières qui se présentent souvent sous la forme de roches disloquées et plissées couvrent des surfaces étendues dans les zones des charriages frontaux du Jura.

3 – Pas de roches antérieures au Muschelkalk dans le cœur des plis

Le profil de la région de Balmberg, situé au nord du Weissenstein, à 6 km au nord de Soleure (fig. 61) illustre un pli dont le cœur, par faute de place, ne peut pas comporter des séries du Trias inférieur, du Permien ou du Carbonifère schisteux. Pour A. Buxtorf, cette particularité locale paraît être représentative de l'ensemble des structures de la chaîne où le groupe de l'anhydrite est toujours présent dans les zones les plus déformées mais sans jamais y être accompagné par des sédiments du Trias inférieur ou par des roches plus anciennes. Ce n'est qu'à partir des massifs cristallins alpins, dans un environnement structural très différent, que les assises du Trias inférieur et des roches plus anciennes se trouvent entraînées dans les déformations tertiaires.

Pour A. Buxtorf, la non-participation du socle au plissement n'est pas uniquement liée à la présence

du niveau plastique de 80 m de puissance au moins, composé d'anhydrite, de gypse, d'argiles salifères, avec de rares niveaux dolomitiques, mais aussi à sa position, qui permet d'assurer le décollement de la couverture par d'intenses déformations.

4 – La géométrie du socle

Dans sa publication de 1908, A. Buxtorf établit donc quatre profils (fig. 62) de la couverture plissée du Jura oriental placée au-dessus de son socle en partant des données de Jean-Baptiste Greppin, Fritz Jenny, Casimir Mösch, Friedrich Mühlberg, Louis Rollier, Ulrich Stutz et August Tobler (1872-1929) (BUXTORF, 1908); le profil ouest se situe au niveau de la transversale Bâle-Soleure; celui de l'est va de Koblenz (jonction du Rhin et de l'Aar) jusqu'aux Lägern. Le long de chaque profil, le niveau du socle est établi en reportant dans les zones synclinales ou sub-tabulaires l'épaisseur des séries sédimentaires présentes. Cet exercice conduit à conclure que la surface du socle présente peu de relief; elle s'enfoncé faiblement en direction du sud, subit éventuellement de faibles dénivellations dont la plus marquée pourrait être une flexure ou une faille se situant le long de la ligne marquant le passage du Jura plissé au Jura tabulaire (ligne du Mont Terrible – aujourd'hui Mont Terri). Les grabens du Jura tabulaire (fig. 62, profil n° 3) pourraient s'amortir au niveau des assises évaporitiques du Trias. Dans ce même profil, le Jura tabulaire est encore associé avec un pli (Homberg). La tendance au renversement des plis en direction du sud est manifeste et accompagne celle des chevauchements. A. Buxtorf juge que les relations socle-couverture, reconnues dans l'est du Jura, doivent être présentes dans l'ensemble de la chaîne, impliquant un déplacement de cette couverture depuis le bord de la zone alpine jusqu'au niveau de la zone externe du Jura plissé et en France jusqu'à la bordure de la Bresse.

Cette proposition visant à faire du Jura une couverture décollée, charriée et plissée au front des Alpes, avec des plis déjetés vers le nord, implique que l'ensemble du secteur situé au front de la chaîne alpine, dont le Bassin molassique, a été transporté de plusieurs kilomètres dans cette direction. L'ensemble des propositions de A. Buxtorf est assez rapidement accepté par la plupart des géologues actifs dans la chaîne en dehors de L. Rollier qui, dès que la mention de décollement apparaît,

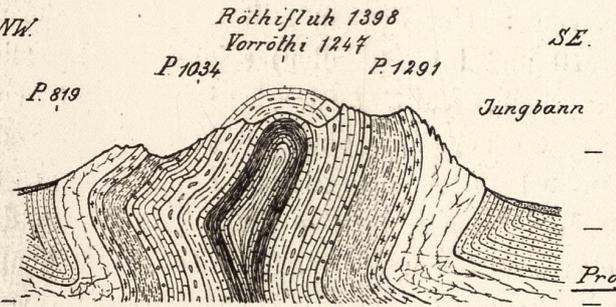
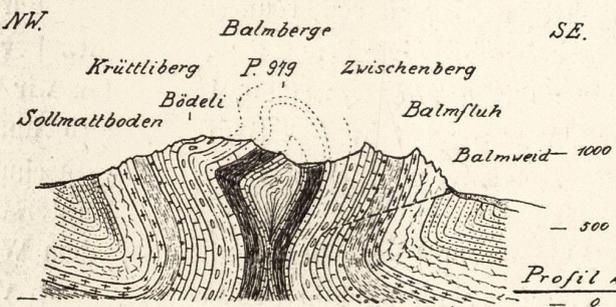
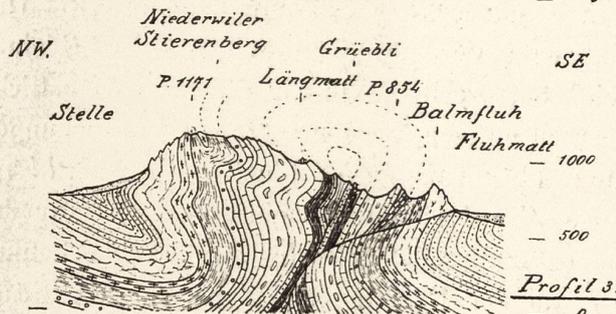
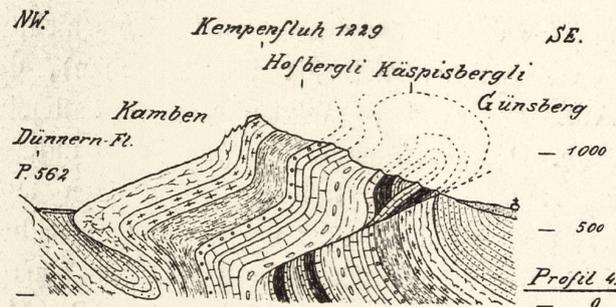
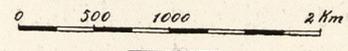


Fig. 7.

Vier Profile
durch die
Weissenstein-Kette
bei
Balmberg u. Günsberg.
(Entwurf)

Aufgenommen v. A. Buxtorf
(Okt. 1906 - April 1907)

Maassstab 1:50000.



Legende:

- Quartär
- Tertiär
- Kimmeridge
- Sequan
- Argovien-Oxford
- Ob. Dogger
- Hauptrogenstein mit Homomyen-Mergeln
- Blagdeni-Murchisonae-
- Opalinuston Sch.
- Lias
- Keuper
- Ob. Muschelkalk
- Anhydritgruppe

A. Buxtorf 294
April 1907

Fig. 61 : Profils de la région de Balmberg, au nord du Weissenstein, extrait de *Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz* de A. BUXTORF en 1908.

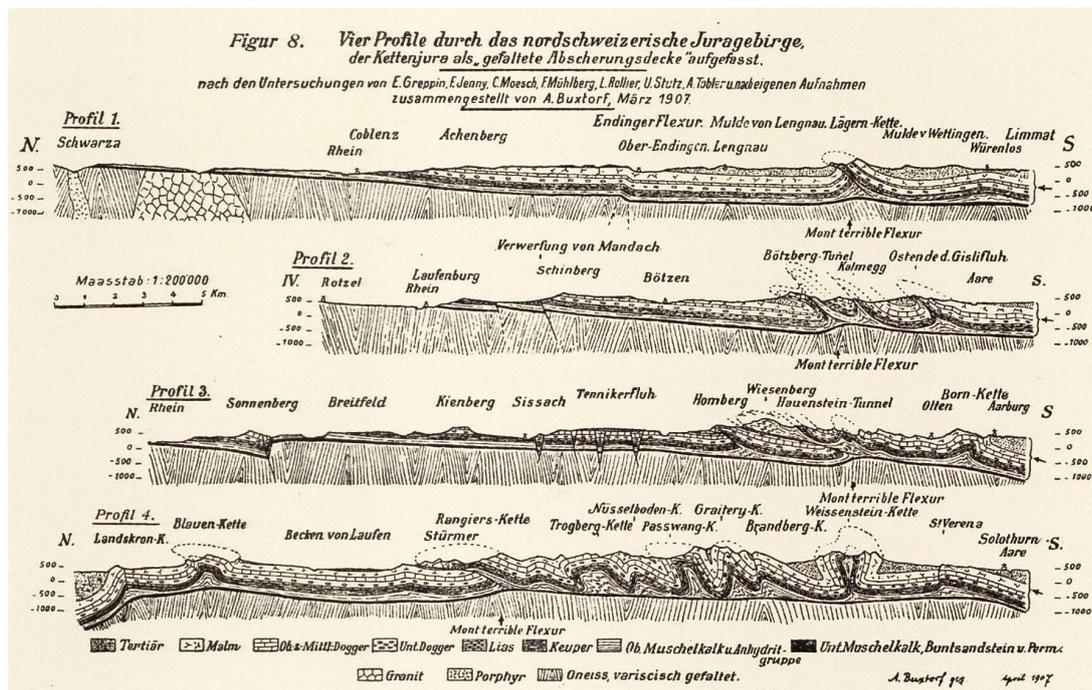


Fig. 62 : Quatre profils de la couverture plissée du Jura oriental placée au-dessus de son socle, extraits de *Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz* de A. BUXTORF en 1908.

s'en prend vivement à son collègue l'accusant « de construire des profils dans des régions totalement inconnues afin de soutenir une idée théorique et préconçue » (ROLIER, 1910, p. 221). Il ne peut admettre que le plissement du Jura procède uniquement d'une poussée venant, du sud, en direction des massifs hercyniens des Vosges et de la Forêt-Noire; il lui paraît difficile d'envisager des conditions permettant d'empêcher le déplacement des sédiments du Trias inférieur et du Permien placés au-dessus du socle cristallin.

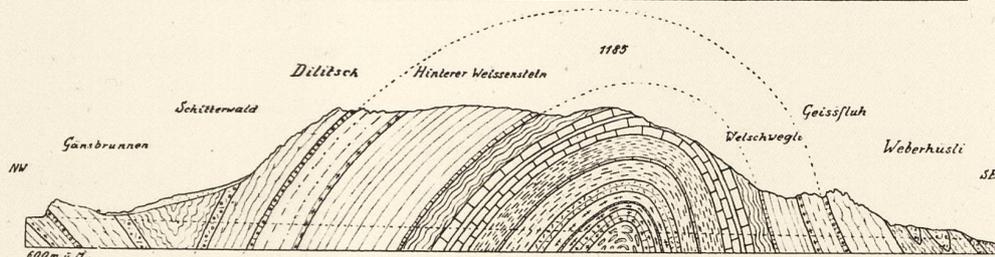
Après avoir proposé le décollement de la couverture du Jura, A. Buxtorf déploie une très importante activité en suivant avec une grande attention le percement de trois nouveaux grands tunnels ferroviaires qui sont alors entrepris dans le Jura: le tunnel du Weissenstein (début du percement en novembre 1913), le tunnel de base du Hauenstein (début des travaux en février 1912, percement le 10 juillet 1914) et le tunnel de Granges-Moutier (études préliminaires en novembre 1911, début du percement en octobre 1914).

6. 5. 2. Tunnel du Weissenstein

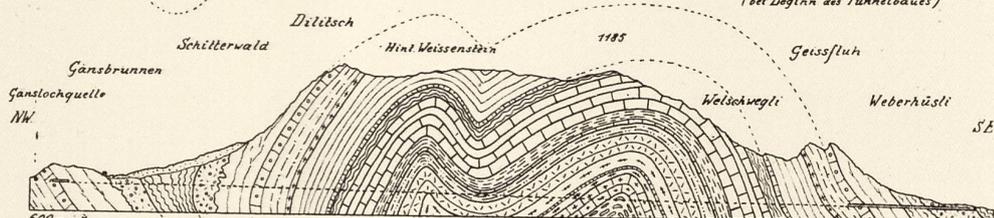
La chaîne du Weissenstein est une structure marquante du Jura plissé. Au-delà de Bienne, en direction de l'est, par ses reliefs élevés, elle assure, jusque près d'Olten, une limite franche entre le Jura et le Bassin molassique. C'est dans la partie médiane de son extension, au niveau de Soleure que le tunnel du Weissenstein a été projeté et construit. Les premiers travaux, basés sur une approche essentiellement morphologique, donnent à cette structure une allure assez régulière (fig. 63, BUXTORF, 1908). A. Buxtorf suit avec un grand intérêt les données obtenues au cours du percement de la chaîne du Weissenstein où il est en contact étroit avec L. Rollier et C. Schmidt, les deux géologues chargés d'établir les nouveaux profils demandés par les entreprises. Les études de terrain de C. Schmidt (fig. 63, profil n° 2) puis par A. Buxtorf (fig. 63, profil n° 3) font état de complications internes avec le développement de deux noyaux anticlinaux. Une suite de profils dessinée d'est en ouest, à partir d'une cartographie soignée, montre que ces

Fig. 9. Das Profil des Weissensteintunnels in historischer Darstellung.

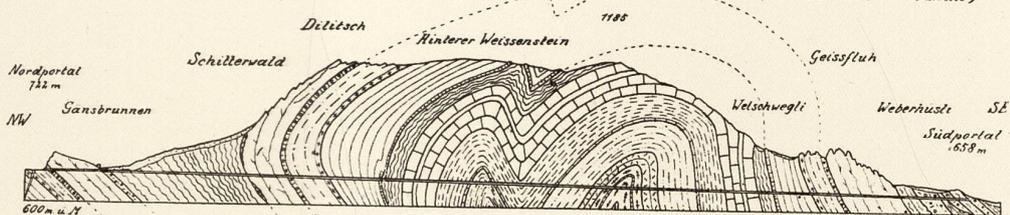
1. Geologisches Profil durch den Weissenstein in der Richtung der Tunnelaxe, entsprechend den Darstellungen vor August 1904.



2. Entwurf des geologischen Profils durch den Weissenstein in der Richtung der Tunnelaxe von C. Schmidt, August 1904 (bet Beginn des Tunnelbaues)



3. Geologisches Profil durch den Weissenstein in der Richtung der Tunnelaxe nach den Aufnahmen von A. Buxtorf, 1905-1907 (nach Durchstich des Tunnels)



Legende

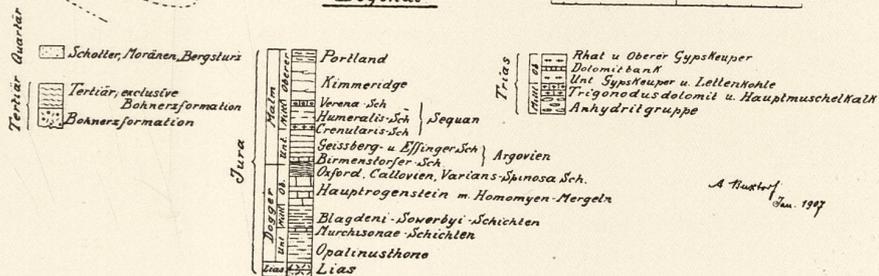


Fig. 63 : Tunnel du Weissenstein, extrait de Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz de A. Buxtorf en 1908 p. 117, figure 1.

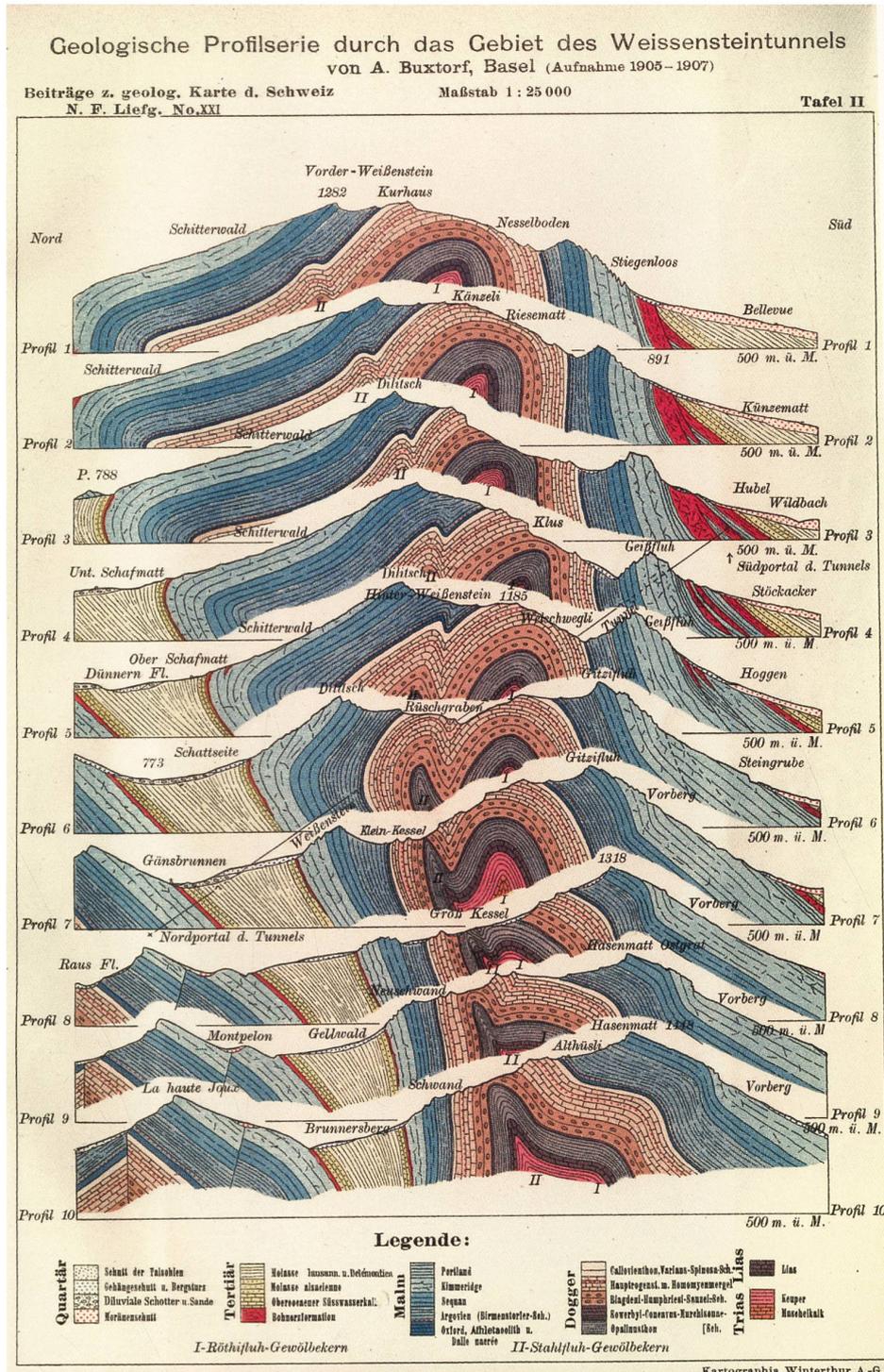


Fig. 64 : 10 profils dessinés d'est en ouest dans la région du Weissenstein, extraits de *Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz* de A. Buxtorf en 1908, planche II.

deux noyaux se relaient (fig. 64, BUXTORF, 1908); celui situé au sud dans le profil n° 1, dominant la structure, alors que celui placé au nord ne forme d'abord qu'une petite ride au niveau des assises du Dogger du flanc nord. De là, en direction de l'ouest, cette structure anticlinale se développe pour être au niveau du profil n° 6, presque équivalente de celle située plus au sud. Plus à l'ouest encore, elle prend une allure pincée, intrusive qui devient dominante alors que s'efface la voûte située au nord.

Cette évolution reconstruite en plan à partir de la fig. 64 (BUXTORF, 1908), illustre les situations de confluence des plis, un phénomène qui marque l'ensemble des zones plissées du Jura. A. Heim en présente différentes schématisations dans *Geologie der Schweiz* (1919-1922) ainsi qu'une variante dans le plan de la proposition de A. Buxtorf pour illustrer la situation au Weissenstein.

Conscient de ses capacités d'analyse structurale et des difficultés que présente cette tâche, A. Buxtorf établit sa propre série de profils au travers de cette chaîne où l'érosion s'est enfoncée jusqu'aux assises du Muschelkalk, bordées de part et d'autre par les flancs fortement redressés de séries du Dogger et du Malm, ce dernier surmontant les dépôts du Tertiaire des zones synclinales voisines. Les données de terrain, puis celles provenant de la galerie, apportent la preuve que les assises inférieures au groupe de l'anhydrite, très déformées, ne disposent pas de la place nécessaire pour former le cœur du pli, en continuité avec leur enveloppe.

Des constatations semblables avaient déjà été évoquées par F. Mühlberg, qui avait songé, sans en être satisfait, que les couches les plus profondes auraient pu être incorporées dans le socle pour y former des plis d'allure synclinale (MÜHLBERG, 1889a). A. Buxtorf renonce à cette solution du fait que les assises du groupe de l'anhydrite, très largement affleurantes dans les plis voisins et dans toute la zone des grands charriages, ne sont jamais accompagnées ni par des sédiments de Trias plus anciens, ni par des roches provenant de niveaux situés au-dessous de la discordance triasique (schistes permien ou carbonifères, ou roches cristallines).

6. 5. 3. Le tunnel de base du Hauenstein

La présentation des données géologiques reconnues lors du percement du tunnel de base du Hauenstein

par A. Buxtorf est l'objet d'une analyse très détaillée et exemplaire de l'auteur (BUXTORF, 1917). Il reconnaît que l'expérience acquise lors des travaux liés à l'exécution du premier tunnel en 1857 (voir Tectonique, chapitre 4.1.2.), d'une orientation cependant assez différente, a grandement facilité les prévisions qui ont également bénéficié de l'amélioration des connaissances géologiques de cette partie de la chaîne. De ce fait, les coupes établies avant les travaux, tant celles de F. Mühlberg que celles qu'il a lui-même proposées, sont très proches et ne diffèrent que très peu de celles qui ont été établies après le percement (fig. 65). Ces illustrations montrent que ces deux géologues maîtrisent assez bien les conditions rencontrées dans cette partie de la chaîne, pourtant assez complexe. Au niveau structural, dans la zone où le Jura plissé chevauche le Jura tabulaire, ils doivent cependant reconnaître que leur appréciation n'a pas toujours été confirmée lors du percement des tunnels. Des structures différentes de celles qui avaient été prévues sont tout de même rencontrées; les plus importantes différences constatées sont examinées ci-dessous en suivant l'avancement du tunnel depuis son portail sud.

Le passage entre les unités de la Bergfluh et du Dottenberg, où F. Mühlberg pensait rencontrer une structure anticlinale, est en fait marqué par une zone de discontinuité très perturbée de Keuper dans laquelle sont présentes différentes écaillés, dont certaines sont formées de Muschelkalk. Pour A. Buxtorf, cette situation montre que la structure du Jura n'est pas uniquement formée de plis et de charriages, mais qu'elle comporte également des zones où dominent des déformations plastiques complexes, apparemment très étirées.

Avant les travaux, les deux géologues avaient fait part de leurs craintes sur les conditions qui pouvaient être présentes dans la zone de chevauchement majeur où le Jura plissé s'avance sur la formation tertiaire du Jura tabulaire. À ce niveau, on pouvait s'attendre à être en présence de roches intensément déformées, pouvant s'étendre sur une distance assez importante avec la possibilité d'y rencontrer des niveaux de sel. Les observations faites en galerie ont été très rassurantes. Elles montrent que la zone de charriage, située comme prévu sous les niveaux du groupe de l'anhydrite, garde sa puissance habituelle. C'est à sa base, là où se rencontre ordinairement le niveau d'halite,

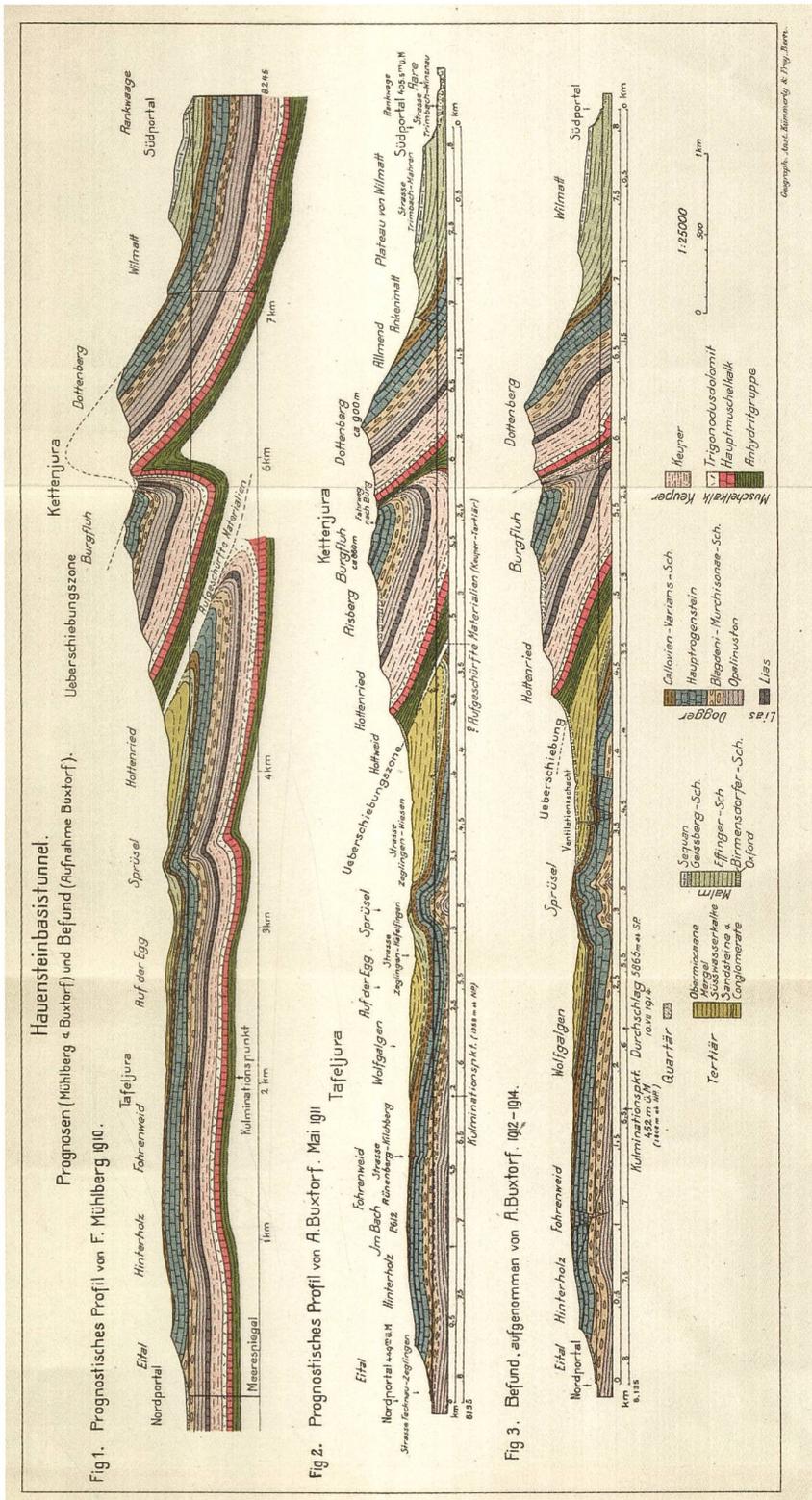


Fig. 65: Le tunnel de base du Hauenstein par A. Buxtorf en 1917, extrait de Prognosen und Befund beim Hauensteinbasistunnel. Profils 1 et 2, prévision ; profil 3 établi après le percement.

que se situe le plan de charriage principal qui n'est marqué que par un horizon très déformé dont la faible puissance varie entre 50 cm et 6 m. Contrairement aux propositions de A. Heim, cet horizon ne peut pas être rapporté à une partie précise d'un pli et ne peut être décrit que par un terme vague évoquant son caractère de zone triturée. On y reconnaît des traces de sel, mais celles-ci sont infimes et ne s'observent que par des efflorescences apparaissant dans les zones humides. Au-delà de la zone de charriage, les séries tertiaires discordantes sur le Malm présentent un pendage au sud de quelque 25°, pratiquement parallèle au plan de charriage. Dans le tunnel, contrairement à ce qui avait été envisagé, ce sont ces niveaux tertiaires, près de la zone de charriage, qui auraient été produits par ce phénomène. A. Buxtorf estime même que les observations faites au niveau du tunnel ne doivent pas évoluer avec la profondeur.

La légère flexure observée dans la Jura tabulaire au-delà du charriage paraît s'être produite peu après le Miocène supérieur; elle serait donc la conséquence du charriage de la zone plissée sur le Jura tabulaire. Dans la Jura tabulaire, les assises du Malm, placées sous le Tertiaire discordant, sont marquées par de petits grabens en coin qui soulignent ici aussi l'évolution anté-miocène de ce secteur. Au-delà, la petite structure anticlinale du Sprüssel montre, avec ses deux bombements, que le Jura tabulaire possède ses propres plis. Finalement à 4,5 km du portail nord, au niveau d'une faible structure en coin, se situe la trace d'une faille plongeant au sud, en gros parallèlement au charriage principal, avec le même sens de déplacement. C'est une preuve supplémentaire qui montre que le régime des contraintes qui a provoqué le chevauchement du Jura plissé sur le Jura tabulaire était également présent au-delà de la zone de charriage, jusque dans les assises sub-tabulaires du Jura tabulaire.

6. 5. 4. Le tunnel Granges – Moutier ou du Grenchenberg

Quelques années après avoir présenté ses propositions faisant du Jura une nappe de charriage plissée et décollée, A. Buxtorf est engagé en tant qu'expert pour assurer le suivi du percement du nouveau tunnel situé entre Granges et Moutier. Il s'engage à fond dans cette aventure qui est très

probablement perçue comme un test lui permettant de juger la validité de sa proposition.

Bien que les données récoltées lors du percement de ce long tunnel soient assez inattendues, A. Buxtorf les considère comme illustrant certaines conditions qui ont dû être présentes en profondeur lors de la formation de la chaîne du Jura; elles doivent donc permettre d'en préciser certains aspects, souvent cachés, et qui, pour cette raison, méritent une attention toute particulière. Les propositions que A. Buxtorf est amené à prendre résultent de l'interprétation de faits précis. Dans certains cas où plusieurs solutions paraissaient possibles, il est nécessaire de faire des choix; ont été retenus ceux conduisant à la présentation de solutions cohérentes, débouchant souvent sur des questions judicieuses.

La première coupe géologique publiée sur les structures qu'on pensait rencontrer lors du percement de ce tunnel est celle de L. Rollier (fig. 66, BUXTORF & TROESCH, 1917). Elle présente deux anticlinaux d'allure simple: celui du Graiteray, avec une voûte régulière assez basse, qui est chevauché sur le flanc nord par l'anticlinal de la Montagne de Granges (Grenchenberg) en forme de chevron symétrique, dont le flanc sud renversé domine les assises tertiaires du Bassin molassique. La proposition de charriage au niveau du synclinal séparant ces deux anticlinaux est justifiée par la présence, sur le flanc nord de l'anticlinal de la Montagne de Granges, d'assises du Jurassique faiblement inclinées vers le sud qui, à ce niveau, sont interprétées comme étant associées à un petit synclinal secondaire.

Après une étude attentive des données de terrain, A. Buxtorf établit ses propres prévisions des structures internes qui devaient être rencontrées dans le tunnel. À la fin des travaux du percement du tunnel, il décide de publier sept profils (fig. 67, BUXTORF, 1913) illustrant la suite des interprétations qu'il a jugées acceptables durant les travaux pour rendre compte des modifications qu'il a dû envisager pour tenir compte de nouvelles observations recueillies au cours du percement.

En se limitant aux modifications les plus importantes de A. Buxtorf et aux considérations structurales, on remarque que d'importants changements ont été apportés par des données et des considérations se rapportant à la géométrie

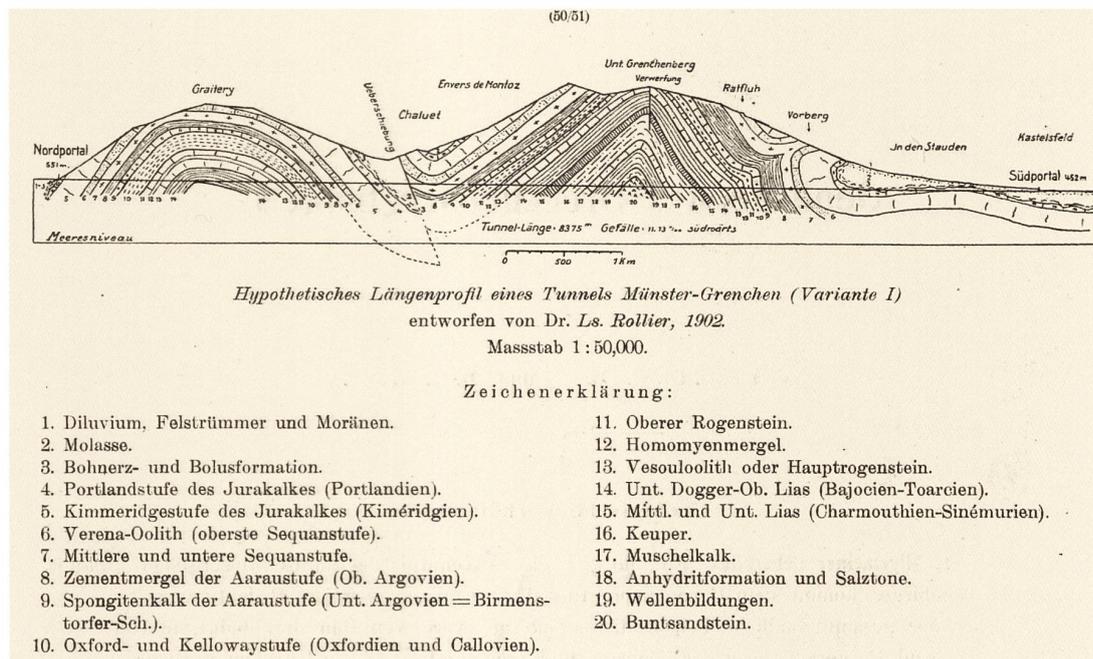


Fig. 66 : Coupe géologique des deux anticlinaux de Graitery et de la Montagne de Granges de L. Rollier. Extrait de A. BUXTORF et A. TROESCH, 1917.

des dépôts tertiaires; celles-ci nous serviront de guide. Il importe de faire remarquer tout d'abord que les structures reconnues dans les assises tertiaires situées au niveau du portail nord n'ont pratiquement pas été changées au cours des travaux. Au niveau du portail sud, l'ampleur du charriage de la Montagne de Granges sur la bordure du Bassin molassique s'est révélée plus importante que prévu et les travaux entrepris à ce niveau ont montré la présence de nombreuses traces de déformations dans les assises de la Molasse. Au niveau de la zone synclinale séparant les deux anticlinaux, il a fallu totalement modifier les premières propositions. La géométrie du synclinal finalement accepté n'a été reconnue qu'à partir du profil 3 (fig. 67). La structure de la zone des rochers du Chaluet qui avait été envisagée au départ comme pouvant être liée à un tassement (profils 1 et 6, fig. 67) est finalement considérée comme un synclinal relativement symétrique légèrement couché, chevauchant la zone synclinale séparant les deux plis majeurs par un plan de charriage très redressé (profil 3, fig. 67, en fait

une reprise de L. Rollier, voir fig. 66). Les complications tectoniques rencontrées au cœur de la Montagne de Granges, au niveau des assises du Lias et du Keuper, sont d'abord mises en relation avec une faille subverticale limitant le flanc sud du pli (profil 3, fig. 67). Par la suite, A. Buxtorf envisage que la zone des déformations du cœur de la Montagne de Granges se trouve associée à un plan de charriage subhorizontal supportant le flanc nord de la Montagne de Granges, en étant lié à un important synclinal couché s'étendant des rochers du Chaluet jusqu'au cœur de l'anticlinal (profil 5, fig. 68). Des lambeaux de différentes formations rencontrées au niveau de ce plan de charriage et sa tendance à s'enfoncer en direction du nord, conduisent ensuite A. Buxtorf à rectifier totalement sa géométrie. Faute de mieux peut-être, ce dernier devient la structure majeure de cette zone en limitant son cheminement en direction de la profondeur pour se placer sous l'ensemble des structures du flanc nord de la Montagne de Granges en englobant le synclinal du Chaluet et aboutir au niveau du

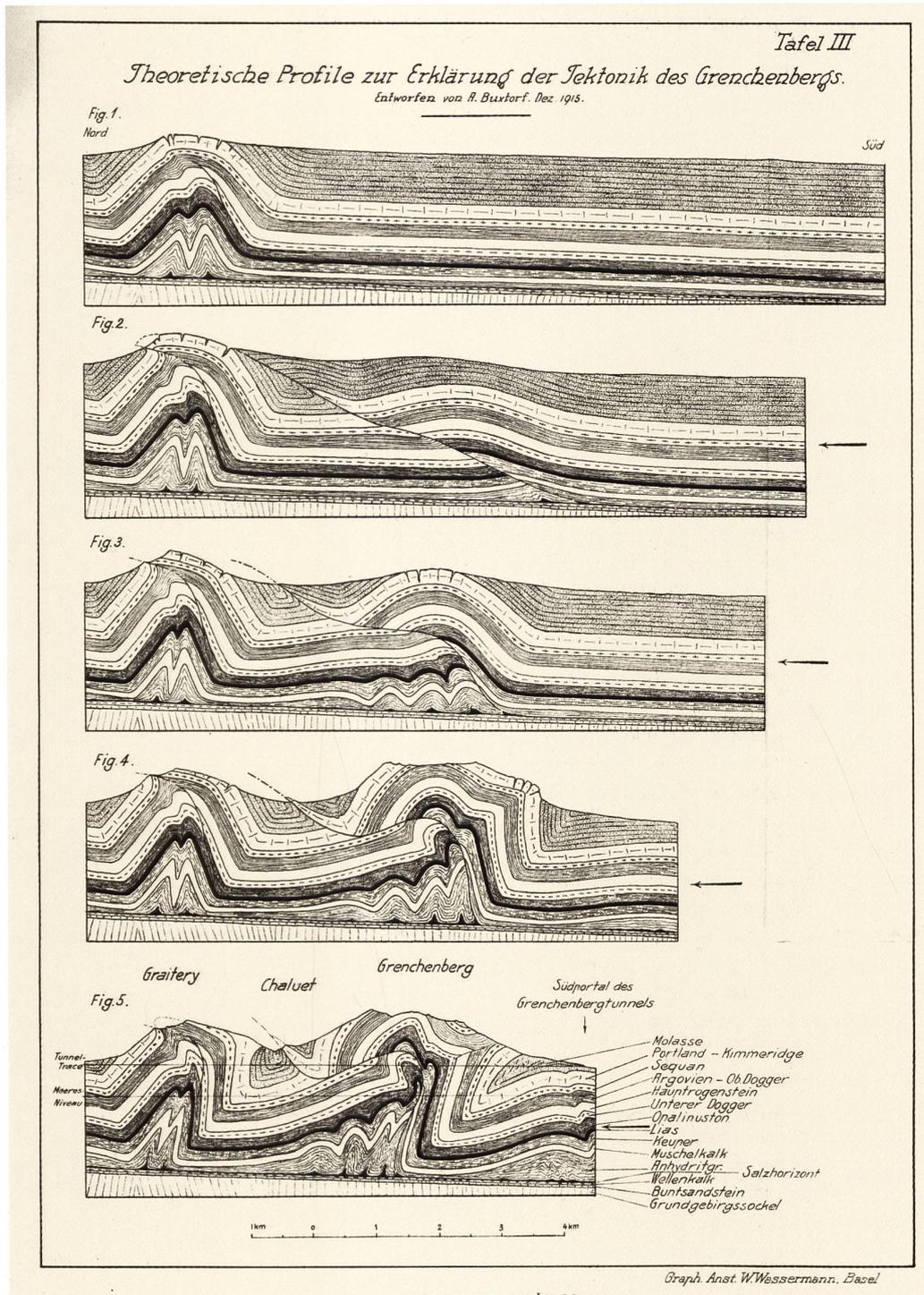


Fig. 68 : Reconstitution au cours du temps de la structure interne de la chaîne du Jura au niveau du tunnel Granges - Moutier. Extrait de A. BUXTORF et A. TROESCH en 1917, planche III.

synclinal majeur séparant les deux anticlinaux du Graiteriy et de la Montagne de Granges.

Après avoir reconstitué la structure interne de la chaîne du Jura au niveau du tunnel Granges-Moutier en utilisant les données recueillies sur le terrain et dans le tunnel, A. Buxtorf s'engage à reconstruire la façon dont cette structure s'est développée au cours du temps, en s'appuyant sur les données recueillies lors du percement, tout particulièrement celles mettant en lumière l'existence d'un plan de chevauchement plissé, ainsi que celles se rapportant aux idées générales qui se sont imposées dans la connaissance de la chaîne. Cette reconstitution est présentée dans le schéma devenu classique de la figure 68 (BUXTORF & TROESCH, 1917). Sous l'effet du glissement de la couverture induit par la poussée alpine, le pli du Graiteriy précocement formé entrave les possibilités de glissement et entraîne la formation d'un plan de charriage oblique au travers de la couverture (fig. 2 de la fig. 68). Sous l'effet de la poursuite du glissement à l'arrière de ces structures et de son blocage à l'avant, on assiste à la poursuite du plissement de l'ensemble des structures présentes, en particulier au niveau du plan de charriage (fig. 3 de la fig. 68). La figure 4 de la figure 68 situe l'accentuation du pli du Graiteriy et de la Montagne de Granges (Grenchenberg) avec son plan de charriage plissé, présenté avec les effets de l'érosion. A. Buxtorf précise que son dessin respecte les longueurs des différents niveaux engagés dans cette évolution. Les commentaires de Dominique Frizon de Lamotte (né en 1953) sur l'évolution de cette structure illustre les difficultés que de nombreux géologues français éprouvent face à des articles rédigés en allemand (FRIZON DE LAMOTTE *et al.*, 2002). Dans ce cas, l'auteur se contente de reprendre une illustration, notée « figure 13 », parue dans le *Traité de tectonique* de Jean GOGUEL (1908-1987) publié en 1952, pour commenter un travail dont il a ignoré l'original et en négligeant le contexte dans lequel le travail de A. Buxtorf a été élaboré (opposition Heim-Buxtorf au sujet de la formation des chevauchements).

L'évolution présentée par A. Buxtorf apporte un important soutien aux travaux de F. Mühlberg se rapportant aux cluses d'Oensingen et de Mümliswil; il montre que les critiques présentées par W. Delhaes et H. Gerth basées pourtant sur une cartographie exemplaire de précision,

témoignent qu'un travail d'une telle qualité n'est pas suffisant pour éviter des interprétations erronées (DELHAES & GERTH, 1912).

A. Buxtorf fait remarquer que l'évolution des plis dans la zone étudiée, sous l'effet d'une poussée au nord, conduit, dans sa phase finale, au renversement des structures en direction du sud. Il relève que cette situation présente une analogie avec le renversement des structures alpines du sud des Alpes mises en évidence par les travaux d'Émile Argand (1879-1940) qui « insubriennisent »² cette phase tardive. A. Buxtorf reprend cette formulation pour le Jura tout en reconnaissant que son utilisation pose un problème par le fait que l'ensemble du plissement du Jura doit être rapporté au Pliocène tardif, alors que le développement de la phase insubrienne alpine est nettement plus précoce.

L'auteur souligne l'apport des descriptions de Maurice Lugeon (1870-1953) qui a décrit le décollement des assises sédimentaires au-dessus du Trias inférieur de la région de la Dent de Morcles où s'observe ce qui peut être proposé théoriquement dans le Jura (LUGEON, 1909). Ces observations en zone alpine rejoignent celles que l'auteur avait faites à l'ouest du massif de l'Aar dans la région du Lötschenpass où les sédiments autochtones du Jurassique manquent totalement au-dessus des quartzites triasiques et des arkoses permienes.

Les propositions présentées par A. Buxtorf sur l'évolution du charriage de la Montagne de Granges furent généralement bien reçues, mais les commentaires français face à la proposition de A. Buxtorf sont divers. J. Goguel reprend la figure de l'évolution proposée par A. Buxtorf (GOGUEL, 1952, 1965) en l'accompagnant d'une figure illustrant la situation actuelle de cette structure, et en ajoutant dans la légende :

« En dessous: stades successifs de la déformation, montrant d'abord le jeu des failles, puis le

² La ligne insubrienne (appelée aussi ligne péri-adriatique, ligne du Canavese, ligne du Tonale, ligne de la Pusteria, ligne du Gail ou ligne des vallées Giudicarie) est un important alignement de failles crustales reliées entre elles selon une orientation générale est-ouest et en position sub-verticale. Elles séparent le domaine Sud alpin de la ceinture axiale des Alpes constituée par un empilement de nappes de socle métamorphisées et correspondant au Pennique (source Wikimedia).

plissement, qui a déformé celles-ci [...] en fait l'anticlinal de gauche aurait aussi-bien [sic] pu se produire, non avant mais en même temps que ou après l'anticlinal de droite» (GOGUEL, 1965, p. 187).

Il ajoute plus loin :

«Lorsque la première phase de plissements est allée jusqu'à la formation de nappes, que ce soit par accentuation de plis couchés, ou par le jeu de failles plates, l'ensemble retrouve une structure grossièrement stratifiée, et peut facilement se plisser à nouveau. Les failles plissées du Houiller du Nord, constituent un exemple de ce cas, de même que la célèbre coupe du Grenchenberg, dans laquelle il est évident qu'il y a eu d'abord jeu d'une faille plate puis plissement d'ensemble.» (GOGUEL, 1965, p. 189).

La figure du Grenchenberg, reproduite par J. Goguel dans son « *Traité de tectonique, 2^e édition* », (GOGUEL, 1965), ne présente malheureusement pas la trace du tunnel avec les quatre secteurs où furent observées d'importantes zones de déformation. Celles-ci furent assez rapidement assimilées à des zones de chevauchement qui, pour A. Buxtorf, sont les traces d'un seul et même chevauchement formé avec une géométrie plane qui s'est trouvée déformée au cours de la poursuite du plissement. Cette heureuse proposition, qui ne fut pas justifiée par l'auteur, s'est imposée, bien que d'autres solutions eussent pu alors être envisagées, comme la présence de plusieurs surfaces de chevauchement.

A. Heim souscrit partiellement à la solution envisagée pour le Grenchenberg, qui représente l'évolution extrême des structures présentes dans la région d'Oensingen où les voûtes du Dogger, du Farisberg et du Weissenstein enracinées au sud, viennent chevaucher les flancs sud de ces structures anticlinales. A. Heim qualifie ce type de structure de « *Gewölbescheitelbrüche* » et en présente un schéma évolutif (fig. 69, HEIM, 1919). Par ce dessin, l'auteur montre qu'il les associe à l'évolution d'un pli dont la clé de voûte se trouve sectionnée, en conduisant à l'étirement du flanc chevauché.



Fig. 69 : Évolution des fractures du sommet de la voûte (*Gewölbescheitelbrüche*) de Albert HEIM en 1919, extrait du volume I de *Geologie der Schweiz*, p. 590.

Il n'admet pas que la structure de départ soit une surface plane de chevauchement recoupant obliquement une pile de niveaux sédimentaires. Pour lui, ces types de charriages résultent toujours de l'évolution de plis où le sectionnement ne se fait pas à la moitié du flanc chevauché mais dans une position proche de la clé de voûte. Il souligne que ces structures chevauchantes forment souvent d'importantes voûtes pouvant cacher des structures profondes de la chaîne.

6. 5. 5. Les études hydrogéologiques associées aux tunnels ferroviaires

Profitant du percement du tunnel du Weissenstein, Emil Künzli (1874-1951) a présenté, en association avec la description géologique du tunnel (BUXTORF, 1908), la température des roches et les caractéristiques des eaux rencontrées dans cet ouvrage (débits, température et chimisme) (KÜNZLI, 1908). Décrites ci-dessous, ces caractéristiques et celles d'autres tunnels sont rappelées dans Hydrogéologie, chapitre 3 consacré aux grands travaux à l'époque des précurseurs.

La température des roches dans le tunnel est essentiellement fonction de leur enfouissement : des basses températures, entre 8 et 9°C, sont enregistrées au niveau des deux portails (gradient géothermique estimé à 70 m) ; elles s'élèvent à 12,8°C au niveau du faite topographique de la chaîne (gradient géothermique estimé à 130-140 m). Ces températures s'abaissent dans les zones calcaires redressées où transitent des circulations entraînant les eaux de surface vers la profondeur. Ces sources, marquées d'abord par de fortes pressions, perdent assez rapidement ce caractère ; elles sont sensibles aux variations météorologiques, avec des augmentations de débit en périodes pluvieuses et lors de la fonte des neiges. Leur chimisme est influencé par les roches qu'elles traversent ; celles associées aux niveaux du Keuper et des zones voisines sont marquées par des sulfates et des chlorures, alors que celles provenant des séries du Séquanien-Kimméridgien et du Hauptrogenstein sont peu chargées chimiquement. Les analyses bactériologiques montrent que presque toutes ces eaux sont trop riches en bactéries pour convenir à la consommation, attestant ainsi une filtration médiocre en surface qui n'est pas sensiblement améliorée par la profondeur.

Les aspects hydrologiques marquants rencontrés dans le tunnel du Grenchenberg (Montagne de Granges) sont abordés par A. Buxtorf et Alfred Troesch. Ces auteurs montrent que la répartition des sources et leurs débits expriment la perméabilité des roches et se trouvent directement influencés par leur teneur en calcaire ; ils distinguent ainsi quatre classes de roches (BUXTORF & TROESCH, 1917). Les argilites et les marnes sont considérées comme étant totalement imperméables, alors que les calcaires massifs (du

Malm et du Dogger) forment les niveaux les plus perméables marqués par de fréquentes et importantes sources. Entre ces deux extrêmes, les auteurs placent deux groupes de roches : l'un essentiellement imperméable mais marqué par de faibles infiltrations avec de rares sources dispersées ; un autre regroupant des roches partiellement perméables pouvant être marqué par des sources importantes mais relativement isolées.

Cette classification des perméabilités permet de transformer la coupe géologique classique en un profil de perméabilité relative où sont également rapportées les données de toutes les sources rencontrées dans le tunnel, la date de leur reconnaissance, les débits et températures des eaux, ainsi que la température des roches. Cette figure présente également le tracé des isothermes probables des masses rocheuses situées au-dessus du tunnel. Cette représentation montre que la thermique de l'intérieur de ces montagnes est fortement dépendante des infiltrations des eaux de pluie tombant sur ces reliefs ; elles agissent comme un système de refroidissement affectant les roches et les eaux ; l'image thermique de l'intérieur de la montagne est affectée par la nature des roches, leur porosité ainsi que par leur structure. Les flancs redressés des anticlinaux sont particulièrement refroidis, les niveaux molassiques, mêmes peu épais, agissent comme une couverture thermique efficace. Les gradients géothermiques varient de valeurs supérieures à 200 m dans les secteurs de fortes perméabilités pour se réduire à des valeurs proches de 15 m sous la couverture molassique. Par la diversité des conditions rencontrées dans ce secteur, cette étude locale permet de situer les grandes lignes des conditions thermiques qui doivent être présentes en profondeur dans l'ensemble du domaine jurassien.

Les études hydrologiques du tunnel de Granges relatent que, dans cette région considérée comme étant peu marquée par les tremblements de terre, trois faibles secousses sont enregistrées durant la période de percement, les 1^{er} juin, 2 et 11 novembre de l'année 1913. Chronologiquement, ces événements sont postérieurs à l'écoulement d'importantes quantités d'eaux issues des assises du flanc sud de l'anticlinal de la Montagne de Granges. L'ingénieur Max Custer (1870-1923), alors responsable des

travaux, estime que 6 millions de m³ d'eau présents dans les couches verticales ou renversées du Séquanien-Kimméridgien et de la Grande-Oolite sont entraînés hors du tunnel, entre le 27 janvier et le 20 juin de cette année-là. Immédiatement, une relation de cause à effet est proposée pour relier ces deux phénomènes, alors qu'actuellement on serait plutôt tenté de considérer la baisse de pression des fluides comme un facteur éloignant le risque de rupture.

6. 6. Conclusion

Ces trois grands géologues – A. Heim, H. Schardt et A. Buxtorf – ont grandement influencé la géologie suisse au cours de la première moitié du xx^e siècle. Leurs travaux ont été largement utilisés par leurs successeurs et ils n'ont eu à subir que très peu de critiques.

A. Buxtorf est l'homme du Jura Bâlois; très enraciné à Bâle et au Fossé rhénan, il théorise le charriage du Jura par les couches de sel; il ne se consacrera qu'à la géologie du Jura. A. Buxtorf

réussira même à créer un Institut de géologie presque indépendant de l'Université bâloise, surtout réputée pour sa recherche en chimie.

H. Schardt peut être considéré comme l'équivalent francophone de A. Buxtorf. Après avoir travaillé sur les Alpes vaudoises où il a démontré l'allochtonie des Préalpes et mis en évidence le décollement de la nappe des Préalpes le long des évaporites triasiques, il a su imposer Neuchâtel comme un centre de recherche structurale à l'échelle de la Suisse jusqu'à son départ pour l'École polytechnique de Zürich. Son aura l'aurait fait venir pour remplacer A. Heim qui l'aurait lui-même choisi pour lui succéder, et ce, malgré les tensions traditionnelles entre Zürich et Bâle. En effet, il s'agit de deux villes économiques qui essaient d'avoir la primauté en Suisse. Bâle pouvait prétendre à une tradition beaucoup plus ancienne sur le plan culturel; Zürich est une ville plus moderne au sens historique du terme.

A. Heim a su utiliser les travaux de A. Buxtorf et de H. Schardt; il devint ainsi le géologue de la Suisse et son œuvre *Geologie der Schweiz* en est la pierre fondamentale.

Chapitre 7

L'après-guerre : l'empreinte de Hans Peter Laubscher (1924-2015)

7. 1. Des années 1940 aux années 1960

Après les bouleversements apportés par la grande guerre et ceux associés aux propositions de August Buxtorf, les années difficiles de l'après-guerre paraissent marquées au niveau de la poursuite des connaissances de la géologie du Jura par un temps de réflexion, de stagnation partielle. Durant cette « accalmie intellectuelle » générale, prospèrent des modèles simplistes de la Terre, emprunts d'idées héritées du milieu du XIX^e siècle et transmis sous l'influence d'un esprit étroit. Cette période d'environ 1925 à 1965 correspond au « *dark intermezzo* » de Celâl Sengör (né en 1955) (SENGÖR & BERNOUILLI, 2011). Les grandes synthèses ont été mal comprises et mal assimilées. Durant cette période, de nouvelles théories sont testées dans le cadre de travaux régionaux entrepris par une nouvelle génération. Les travaux liés à la reconnaissance de plusieurs périodes de pénéplaines connaissent une grande ferveur, en France surtout, avec des développements qui s'étendent au-delà de la moitié du siècle. En Suisse, on est dans une phase de consolidation où la nouvelle génération, encadrée par des maîtres prestigieux comme Albert Heim, August Buxtorf, Hans Schardt et Maurice Lugeon, est souvent engagée dans des travaux régionaux destinés à assurer l'avancement du nouvel Atlas géologique de la Suisse qui se met en place à partir des années 1930. Ce régime de dépendance, où les jeunes exécutants disparaissent souvent après un travail de thèse de quelques années, est plus propice à la mise en place d'une tradition qu'à l'émergence de conceptions fondamentalement nouvelles. De fortes personnalités, des éléments particulièrement doués dont certains peuvent maintenir une activité prolongée dans un secteur seront les auteurs discrets permettant de maintenir une certaine dynamique de recherche.

7. 1. 1. Maurice Lugeon (1870-1953)

Au moment où l'idée d'associer les chaînes de montagnes à la dérive des continents se précise, M. Lugeon et ses collaborateurs Élie Gagnebin (1891-1949) et Daniel Schneegans (1907-1949), estiment avoir montré que la gravité a joué un rôle majeur dans le glissement et la propagation des unités alpines frontales des Alpes occidentales. Le Jura représente une branche attachée à la partie frontale de ces éléments structuraux; aussi est-il fort probable que les déformations qui ont façonné sa structure soient liées à la même cause qui se trouve partout agissante.

Pour M. Lugeon, les plis du Jura ne sont pas des plis ordinaires, il les qualifie de plis « [...] *hésitants* [...] *dont la forme n'indique pas une poussée dirigée dans un sens.* » (LUGEON, 1941, p. 468); parmi les plis les plus élevés avoisinant la Molasse, plusieurs d'entre eux présentent un déversement en direction de cette zone déprimée tertiaire; pour l'auteur :

« Il y a dans ce Jura de vrais plis en retour. Cette structure si singulière, on sait aujourd'hui qu'elle n'affecte que des masses à base cisailée. Ce sont comme des accumulations de boue s'étant déplacées sur un plan droit. » (LUGEON, 1941, p. 468).

Par ces lignes, l'auteur s'oppose aux observations et considérations de Jules Thurmann en son temps, pour qui la tendance à une vergence des plis en direction de l'extérieur de la chaîne est une de ses importantes caractéristiques; une situation qui, très tôt, suggère des relations étroites entre les deux domaines des Alpes et du Jura. Les remarques de M. Lugeon, peu justifiées par des observations précises de terrain, n'apportent que peu de poids au débat sur la forme des plis dans le Jura d'autant que les plis en retour ne paraissent pas être des structures étrangères aux glissements gravitaires proposés par l'auteur.

Pour M. Lugeon,

« Rien n'a donc poussé le Jura; il n'a pas été comprimé entre deux mâchoires. Alors une conclusion

s'impose, impérieuse. La force qui a plissé le Jura ne peut être que la pesanteur. C'est une bien grosse conclusion, grosse de conséquences, parce qu'elle entraînera certainement avec elle l'histoire mécanique de nombreuses chaînes, de toutes celles qui ne sont pas nées de géosynclinaux, c'est-à-dire de toutes ces chaînes de couverture, de tous ces plis des avant-pays et des plates-formes affectant la pellicule sédimentaire des grands plis de fond d'Argand. [...] Pour qu'une pareille masse ait pu se mouvoir sous la simple action de la pesanteur, de la gravité perpétuelle, il faut trois choses: un plan incliné sur lequel glisse la masse, des creux où elle doit se diriger et éventuellement des pressions verticales. [...] Où sont ici les creux? [...] C'est d'une part la dépression qui sépare le Massif Central, disons le Beaujolais d'avec les Vosges, et d'autre part la fosse du Rhin entre les Vosges et la Forêt-Noire. Or ne voit-on pas que le grand arc jurassien cherche à remplir la première de ces dépressions et que, vers la seconde, le Jura tabulaire lui-même se plisse, élevant en avant-coureurs les anticlinaux de Rechesy, du Burgenwald, du Landskron, du Blauen. Dans le grand arc, il y a deux sous-arcs, peut-on dire. L'arc bisontin qui s'avance entre les Vosges et le petit massif de la Serre, puis l'arc lédonien qui le relaye au sud et qui, bordant la plaine bressanne, va se rattacher aux plis subjurassiens des environs de Chambéry.» (LUGEON, 1941, p. 468-469).

Au vu de notre compréhension actuelle de la chaîne du Jura, déjà largement proposée et entrevue par A. Buxtorf, ou H. Schardt, cette conception de M. Lugeon d'une mise en place du Jura par glissement dans des « dépressions » peu nous apparaît comme mal inspirée. Il ne faut pas oublier qu'à cette époque il n'existait pas de modèle conceptuel et mécanique de la formation de chaîne de montagnes et de nappes d'avant-pays.

7. 1. 2. Louis Glangeaud (1903-1986)

Dans son article « *Les caractères structuraux du Jura* », L. Glangeaud tient à montrer que l'histoire géologique de cette province est plus complexe qu'on ne l'admet généralement, du fait que son évolution comporte plusieurs phases de dislocations et de plissements, séparées par des érosions intercalaires

(GLANGEAUD, 1949b). L. Glangeaud fut professeur de géologie de 1943 à 1955, puis doyen à la Faculté des sciences de Besançon. Il fut le dernier tectonicien du Jura à Besançon (formation servant de lien avec le socle, pincée, faille-pli...) jusqu'à son départ pour Paris en 1955 pour occuper le poste de professeur à la Faculté des sciences de Paris (chaire de géologie dynamique) jusqu'en 1974. Pour cet auteur, les dislocations ante-pontiennes, principalement oligocènes, ont joué un rôle dominant dans l'orientation des faisceaux de plis dans le Jura externe. Ainsi, pour lui, le Jura comtois se distingue par des accidents spéciaux subverticaux, enracinés dans le socle et seulement perceptibles au travers des pincées (étroites zones d'effondrement liées à la distension), des failles plis (anciennes fractures plissées) et des lanières. Ces accidents sont souvent considérés comme étant associés à des manifestations hercyniennes de même type, parfois avec des filons basiques, rappelant ainsi les soulèvements de J. Thurmann. Ces structures sont fort différentes des plis haut-jurassiens qui se distinguent par les phénomènes de disharmonie associés à la présence de niveaux marneux plastiques situés entre des assises calcaires massives et qui conduisent à des structures fort différentes.

Aux yeux de L. Glangeaud, l'ensemble du Jura a déjà été marqué par les effets de phases de dislocations ante-miocènes contemporaines aux effondrements des Fossés du Rhin et de la Bresse. Le plissement est essentiellement associé à deux paroxysmes orogéniques :

- Des événements situés entre le Tortonien et le Pontien inférieur.
- Une phase finale du Pontien supérieur jusqu'au Pliocène.

Ces observations et commentaires sont le fruit de levés de terrain conduits au 1:20 000. Ils permettent à l'auteur l'établissement d'un schéma structural du Jura divisé en six zones :

- 1) Faisceau de style comtois
- 2) Faisceau peu ou pas plissé
- 3) Plis de couverture des plateaux
- 4) Faisceau de faciès ultra-comtois
- 5) Faisceau helvétique
- 6) Zones subsidentes entourant le Jura (Bresse, Bassin rhénan et Bassin molassique).

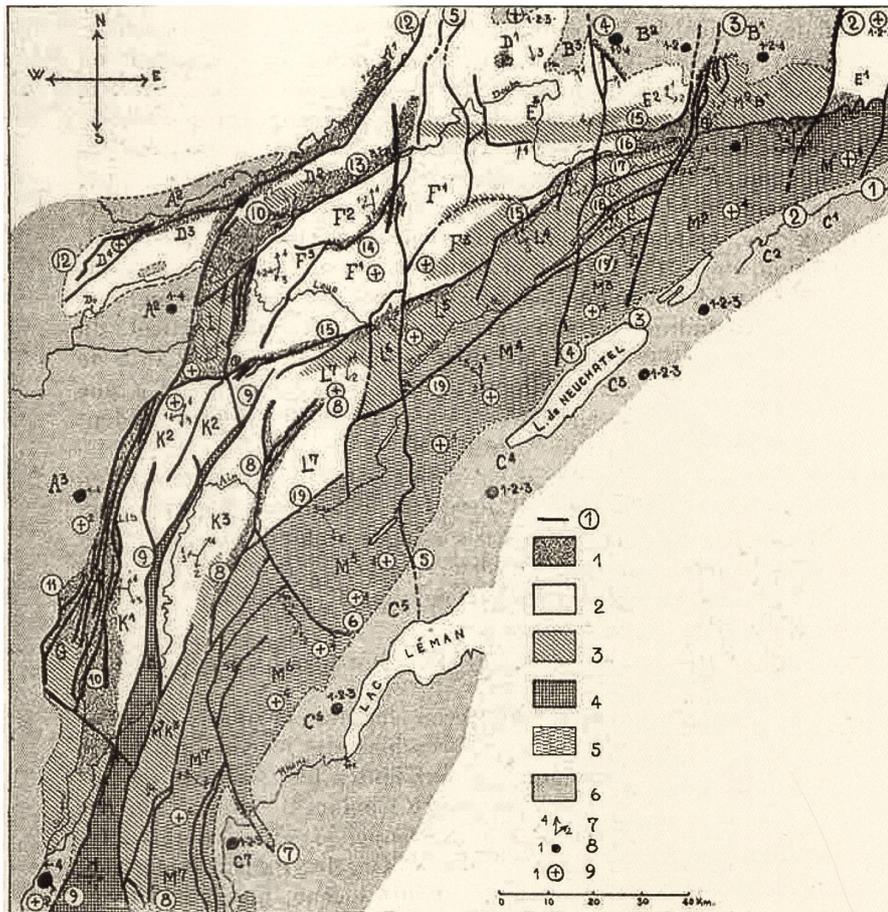


Fig. 70 : Établissement du schéma du Jura divisé en 6 zones structurales extrait de L. GLANGEAUD en 1949b dans *Les caractères structuraux du Jura*. 1 : faisceau présentant le style comtois. 2 : région peu ou pas plissée. 3 : plis de couverture des plateaux. 4 : faisceau à faciès ultra-comtois d'Orgelet-Poncin. 5 : plis du faisceau helvétique. 6 : région subsidente des plaines suisse, bressane et alsacienne. 7 : (petites flèches avec numéros) direction probable des poussées et des glissements au cours des 4 phases indiquées dans le tableau accompagnant le texte. 8 : région de subsidence maximum des fosses (figuré n° 6). 9 (croix entourées d'un rond) : région de montée du socle au cours des phases 1-2-3-4.

Dans ce document, les principales zones de failles du Jura (décrochements, chevauchements, failles normales) sont représentées par un même figuré très appuyé qui impose sa marque à l'ensemble de la structure de la chaîne (fig. 70). De très discrètes flèches indiquent localement la direction probable des poussées et des glissements reconnus au cours des quatre phases de déformation qu'il reconnaît dans le Jura, dont deux sont rapportées à l'Aquitainien, la troisième étant située durant le Tortonien et le Pontien inférieur, alors que

la dernière s'étendrait du Pontien supérieur au Pliocène.

Signalons que l'auteur, dont l'article ne mentionne aucune référence précise de ses sources, locales ou générales, ne craint pas de proposer une figure schématisée sur les relations ayant existé entre la géologie profonde et la structure du Jura externe dans laquelle les plis diapiriques régionaux sont mis en relation avec des décollements situés entre la croûte inférieure et supérieure à plus de 12 km de profondeur. Il est bien possible que de telles

propositions, héritées d'études mal assimilées de la tectonique profonde des socles, n'aient pas été étrangères aux jugements critiques qui furent alors portés sur le niveau de la recherche pratiquée à Besançon et ont conduit à un certain scepticisme sur les travaux pratiqués dans son entourage qui, fort heureusement, restaient en contact avec les données de terrain.

7. 1. 3. Le Jura, source d'inspirations internationales

George Martin Lees (1898-1955), président de la *Geological Society of London* de 1951 à 1953, consacre son billet annuel de 1952 au plissement des zones d'avant-pays, en présentant de nombreuses remarques sur la chaîne du Jura et les dernières publications dont elle a été l'objet par des auteurs locaux ; il évoque de même le fait que A. Buxtorf considérait le Jura comme une nappe de glissement s'avancant sur le socle horizontal de l'avant-pays, poussée par les déformations situées au front de la chaîne alpine (LEES, 1952).

Pour G. M. Lees, les études menées au niveau de nombreuses chaînes d'avant-pays explorées dans le cadre de la recherche pétrolière, tant celles marquées par de simples anticlinaux que celles possédant des structures imbriquées complexes ou même diapiriques, montreraient en fait qu'elles sont le résultat de contractions profondes où la couverture est conduite à se plisser pour s'adapter au raccourcissement du socle sur lequel elle s'appuie. Dans cette étude faisant largement appel à l'anatomie structurale comparative, la chaîne du Jura occupe une place de choix.

7. 2. Hans Peter Laubscher (1924-2015)

7. 2. 1. De 1961 à 1973

De 1960 à nos jours, la recherche géologique suisse dans le Jura est dominée par la forte personnalité de H. P. Laubscher. Après un excellent travail de thèse à Bâle effectué dans le Jura central (LAUBSCHER, 1948) et une activité de plusieurs années à l'étranger dans l'industrie du pétrole, ce chercheur est nommé professeur de géologie à

l'Université de Bâle où il se place rapidement en grand défenseur de la théorie de A. Buxtorf qui se trouve élargie en la plaçant dans le cadre général du plissement alpin en tant que chaîne d'avant-pays (LAUBSCHER, 1961). Dans cette importante contribution, l'auteur défend avec force que le Jura est le résultat du charriage d'une couverture sédimentaire étendue, d'épaisseur réduite qui a été charriée et plissée sur son avant-pays à la faveur d'une poussée distante issue des déformations frontales de la chaîne alpine. La différence d'extension de la couverture dépliée par rapport à celle du socle ne peut pas être rapportée au raccourcissement de ce dernier, comme l'évoquait G. M. Lees en 1952, mais résulte de l'important charriage d'une couverture qui se plisse au cours de son chevauchement (« *Fernschubhypothese* »).

7. 2. 1. 1. La surface du socle

Pour soutenir cette proposition qui est alors occasionnellement controversée, H. P. Laubscher utilise des données récentes recueillies dans le Jura par quelques forages dont ceux implantés en bordure de la Bresse et par des études consacrées aux formations tertiaires. Sa vision se trouve enrichie de considérations nouvelles sur la cinématique de l'évolution régionale tertiaire. Conscient que la force persuasive de la théorie de A. Buxtorf est intimement liée aux arguments géométriques qu'elle a utilisés, H. P. Laubscher suit ce même chemin en appuyant tout d'abord son argumentation sur la reconstitution de la surface du socle sur laquelle la chaîne s'appuie. Le document qu'il établit (fig. 71, LAUBSCHER, 1961), basé sur quelques forages et des données obtenues à partir de l'altitude des synclinaux des zones tabulaires, présente une image assez précise de la surface du socle (isobathes) qui lui permet de rendre compte des principaux événements qui ont marqué son évolution. Elle se présente comme une surface plane, nettement soulevée, marquée par une légère pente en direction du sud-est. Elle n'est jamais affectée par les déformations associées au plissement de la couverture. Certes, cette situation n'apparaît avec netteté que dans les environs de Lons-le-Saunier sur la bordure de la Bresse où les recherches de terrain et les forages montrent que la couverture s'avance sur différentes roches affectées par la tectonique cassante de l'Oligocène, sans en

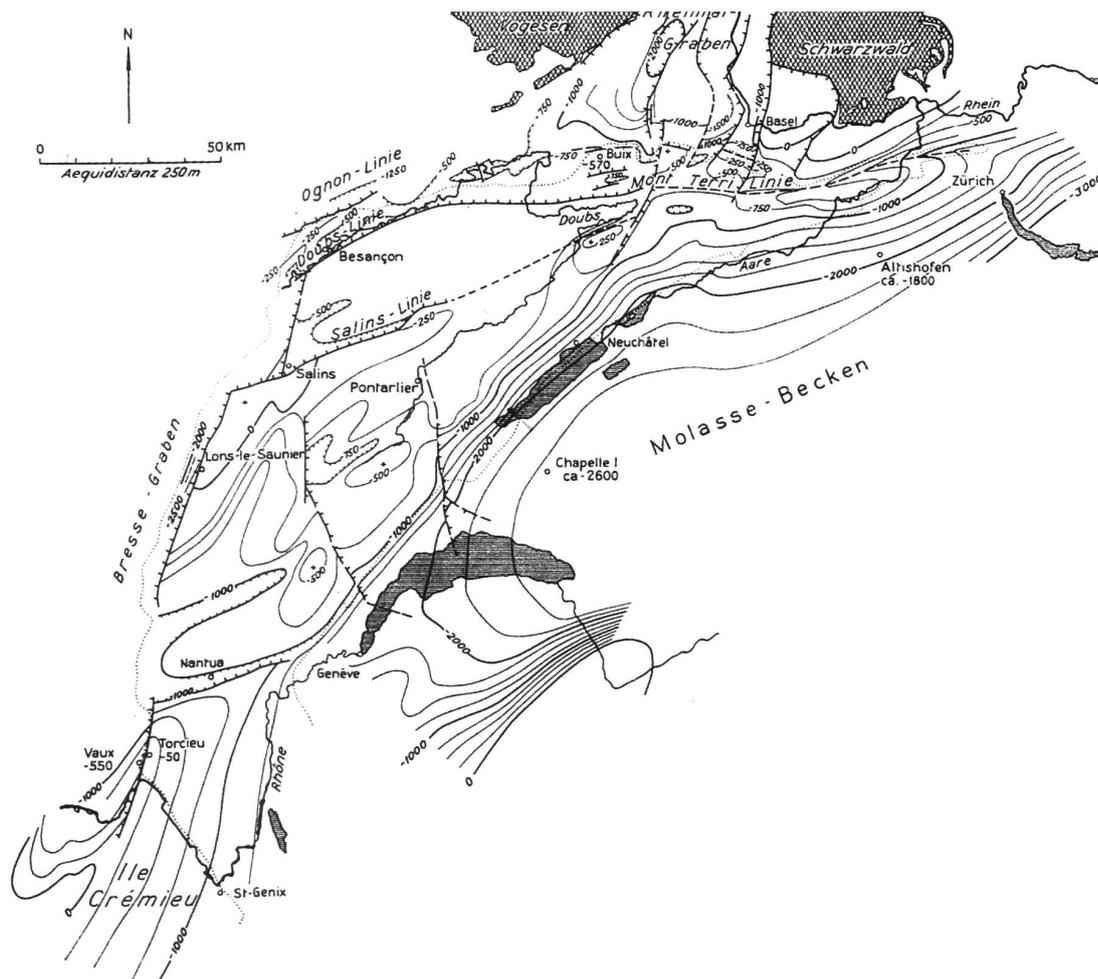


Fig. 71 : Représentation de la surface du socle du Jura (en isobathes) extraite de H.-P. LAUBSCHER en 1961 dans *Die Fernschubhypothese der Jurafaltung*.

perturber la structure (LAUBSCHER, 1961, p. 229). Au niveau de la bordure interne du Jura, la surface du socle proposée par H. P. Laubscher présente une nette flexure inclinée en direction du sud-est. Sous le Jura plissé, l'auteur y reconnaît la trace de failles méridiennes anciennes marquées par de faibles rejets verticaux, assurant son découpage en larges panneaux partiellement indépendants. Pour lui, les grands décrochements qui marquent la couverture plissée se placeraient au-dessus de ces accidents anciens ; une telle proposition tend à suggérer que ceux-ci ont été favorisés et guidés par ces anciens accidents cassants du socle antérieurs

au plissement. Néanmoins, ces structures du socle ont un rôle positif sur l'élaboration des accidents de la couverture, contrairement aux hypothèses de L. Glangeaud qui en faisait le moteur de ces plis-failles, lanières et autres pincées. Ce rapport entre accidents anciens et décrochements qui n'a pas pu être reconnu par les travaux d'Anna Sommaruga (née en 1966) en 1997 et en 2012 avec ses collaborateurs, reste un problème pour de futures recherches.

Sur le bord du bassin subsident de la Bresse, H. P. Laubscher souligne que l'avancée de 5 km au moins de la couverture jurassique par-dessus

le remplissage tertiaire est une parfaite illustration de la grande étendue du chevauchement de la couverture du Jura et que cette situation ne peut être expliquée que par des raccourcissements locaux du socle au niveau des plateaux de Lons-le-Saunier, Champagnole et Nozeroy. De possibles raccourcissements du socle ne peuvent pas être envisagés avant d'atteindre la Haute-Chaîne. Dans ce secteur, le passage du Jura au Bassin molassique, marqué par une importante flexure dont la pente est orientée au sud-est, ne s'accorde pas avec le raccourcissement du socle formant des plis orientés SW-NE. Pour l'auteur, si de tels accidents s'étaient produits à ce niveau, en affectant la croûte sur une importante part de son épaisseur et avec une large extension latérale, ils auraient entraîné la formation de vastes soulèvements ou auraient dû être accompagnés par d'importants enfouissements de matière, deux situations totalement inconnues dans ce secteur. Ces considérations renforcent les objections pouvant être formulées face aux propositions de Daniel Aubert (1959) qui, tout en conservant le rôle des évaporites du Trias pour assurer la discordance tectonique entre le socle et la couverture, proposait que les anticlinaux du Jura vaudois interne soient liés à des écaillés de socle formées sous une faible couverture.

À l'extrémité du Jura central, la surface du socle sous la chaîne (fig. 71) fait apparaître au nord-est du Jura des alignements est-ouest, dont la ligne du Mont Terri qui s'étend de la région de Besançon jusqu'à l'extrémité orientale de la chaîne. Pour H. P. Laubscher, cet élément structural qui dans la région nord-est de la Suisse assure la limite entre le Jura tabulaire au nord et le Jura plissé au sud, est une structure hétérogène et énigmatique dont l'origine pourrait être liée à des failles ou des flexures du socle. Dans ce secteur, les dépôts tertiaires sont marqués par des déplacements verticaux qui s'y sont produits avant le plissement. « *Avant cet événement, le socle du Jura, était déjà marqué sur l'ensemble de son extension par une structuration qui au cours du plissement, est restée essentiellement passive.* » (LAUBSCHER, 1961, p. 233).

L'auteur montre que toutes les données disponibles se rapportant aux déformations ayant affecté les roches évaporitiques lors du charriage du Jura, montrent des coefficients de frottement de très

faibles valeurs spécifiques situées au-dessous de 30 kg/cm². Même avec des valeurs de frottement trois fois supérieures à celles qui sont envisagées, le charriage des roches du Bassin molassique reste parfaitement admissible, soulignant les faibles valeurs de frottement dans les niveaux d'halite, celles-ci pouvant encore être réduites par la présence de fortes pressions de fluides. Au niveau des Massifs cristallins frontaux alpins jusqu'où s'étendent les roches triasiques du Jura, les faibles valeurs de frottement rencontrées conduisent à une instabilité des ensembles sédimentaires situés au-dessus de ces formations. Le fort plongement de cette couverture sédimentaire autochtone provoque son basculement par rotation en direction du nord, en permettant aux éléments les plus frontaux de cette couverture de s'avancer en direction de la plateforme du Jura. Le déclenchement de cette rotation ne demande qu'un faible apport de poussée en provenance des Massifs cristallins. À ce niveau, l'absence locale de la couverture sédimentaire situe les cicatrices d'où s'est détachée l'actuelle couverture du Jura.

7. 2. 1. 2. Conditions mécaniques associées au chevauchement de la nappe du Jura

Pour rendre compte des conditions de charriage de la couverture plissée du Jura, H. P. Laubscher juge qu'il faut reconnaître :

- a) que l'ensemble des roches sédimentaires du Bassin molassique est associé au charriage de la couverture du Jura, produit sous l'action de forces agissant au front de la zone alpine ;
- b) que cette situation est étroitement liée à la faible résistance au frottement des roches situées à la base du charriage.

Il repousse les considérations de G. M. LEES (1952) qui, dans son étude, avait cherché à résoudre les problèmes de la chaîne du Jura en faisant appel à des comparaisons avec d'autres chaînes dont les particularités géométriques avaient été précisées par l'exploration pétrolière.

H. P. Laubscher aborde l'évolution cinématique de la chaîne en examinant son développement à partir de la position élevée qu'elle possède par rapport aux zones de subsidence de la Bresse, du

Fossé rhénan et du Bassin molassique. La structure interne du futur Jura paraît être découpée par des failles qui la divisent en blocs partiellement indépendants pouvant être responsables de la forte divergence d'orientation de certains plis et des différences d'altitude rencontrées au niveau de la surface de charriage. Pour l'auteur, la topographie du socle à la base du décollement, très peu prononcée, est pourtant suffisante pour être la source d'obstacles entraînant des déviations de trajectoires par rapport à l'orientation du transport global ; ces accidents conduisent à la formation locale de refoulements et de plis. Cependant, en ne prenant en compte que l'orientation globale du mouvement telle qu'elle se présente dans la région du faisceau helvétique dans le Jura central, on constate que le charriage garde globalement une direction nord-ouest, parallèle à la poussée alpine, elle-même perpendiculaire à la flexure marquant la bordure interne du Jura. Dans les zones externes du charriage, comme au niveau du faisceau lédonien, la structure est fortement influencée par des entraves qui conduisent à des déplacements orientés perpendiculairement à la bordure du Bassin bressan. Là, comme dans la région d'Ambérieu – Saint-Genis, les plis sont orientés NW-SE à NNW-SSE, donc pratiquement perpendiculaires à ceux du faisceau helvétique ; cette situation est l'expression d'un déplacement de direction sud-ouest semblable à celui de l'anticlinal du Vuache guidé par un important décrochement de même orientation qui, au niveau d'Annecy, passe de la zone des Chaînes subalpines à la zone interne du Jura. Pour situer l'ensemble des mouvements observés dans le cadre général de la couverture déplacée, H. P. Laubscher propose que celle-ci ait subi une rotation horaire de 7°, illustrée par la figure 72 (LAUBSCHER, 1961). Pour justifier cette proposition théorique, il souligne le tracé onduleux de quelques plis de la région du sud-est de la chaîne associés à cette rotation.

Dans sa seconde contribution majeure sur le Jura «*Ein kinematisches Modell der Jurafaltung*» (LAUBSCHER, 1965), l'auteur présente un modèle quantitatif de l'évolution de la chaîne en s'appuyant sur les éléments qu'il juge les plus saillants tout en gardant une porte ouverte pour les nouvelles

données que devraient apporter les recherches futures. Dans cette tentative, il cherche à ne s'appuyer que sur des données de terrain de haute précision. Le modèle proposé est marqué par les propriétés suivantes :

- 1) Il s'agit d'un modèle fermé (absence de transport de matériaux au-delà des limites fixées).
- 2) Les mouvements se font au niveau de surfaces discrètes ; dans une première approche, ceux de nature plastique ou diffuse, jugés négligeables, ne sont pas pris en compte.
- 3) Les domaines d'accumulation tectonique (dépôts) et ceux de compression (zones anticlinales et de charriages) occupent des lieux différents.
- 4) Les mouvements sont abordés dans un espace bidimensionnel du fait qu'ils sont examinés au niveau de la surface plane de décollement.

Un tel modèle conduit à examiner une mosaïque de blocs bidimensionnels de figures planimétriques. Si l'un d'eux est déplacé par rotation, par translation ou par la combinaison de ces deux effets, les différentes parties de leurs limites, toujours fermées, y assument des rôles différents :

- a) La partie frontale est déplacée au-delà du «*Vorland*» régional. La largeur de ce recouvrement marginal est fonction du transport et de la compensation accompagnant le plissement.
- b) Les bordures latérales des failles de décrochements peuvent être marquées par des recouvrements équivalents à ceux des recouvrements frontaux ; ils sont la conséquence de mouvements, dont la direction de transport ne coïncide pas avec le déplacement de l'ensemble. Ils conduisent alors à des recouvrements marginaux ainsi qu'à des trous de la couverture.

L'ensemble des éléments ainsi transportés laissent sur leur arrière une cicatrice, un vide (dénudation tectonique) dont l'étendue est équivalente à celle de l'ensemble des fragments déplacés. Il est également souligné que les failles décrochantes sont associées aux blocs déplacés et sont elles-mêmes associées à la compression des anticlinaux subsistant les effets des décrochements. Les conditions ainsi présentées par H. P. Laubscher réduisent considérablement les limites des mouvements ;

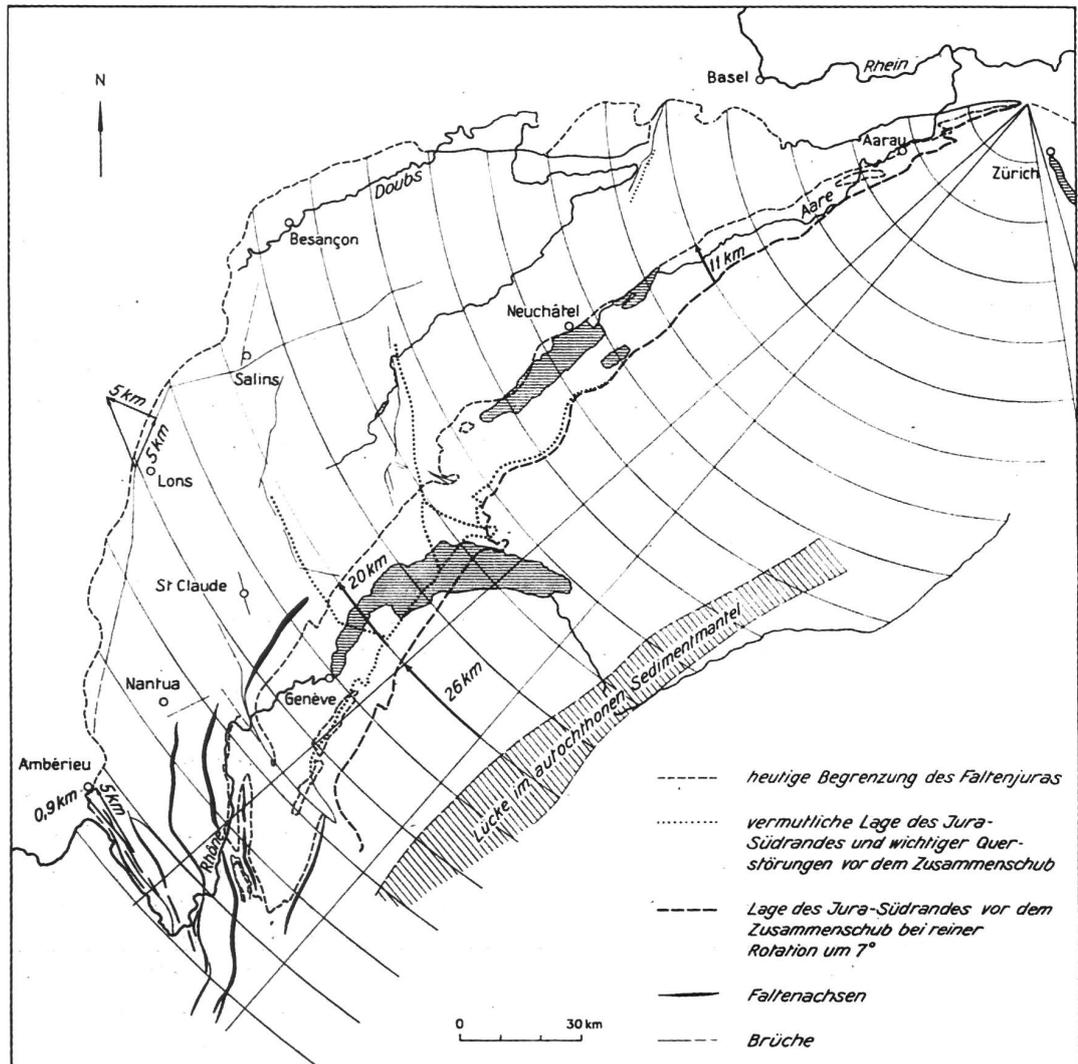


Fig. 72 : Proposition théorique de la rotation horaire de 7° de la couverture déplacée du Jura. Extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1961.

Traduction de la légende des symboles de haut en bas :

- Limites actuelles du Jura plissé.
- Position supposée de la limite sud du Jura et de failles décrochantes importantes, avant le charriage.
- Position de la limite sud du Jura avant le charriage, compte tenu d'une rotation de 7°.
- Axes des plis.
- Fractures.

d'autres limites peuvent être postulées dans des domaines subordonnés du Jura.

Les estimations des conditions de frottement à la base du chevauchement conduisent, au niveau de couches de sel et d'horizons gypseux, à des coefficients de frottement extrêmement faibles qui sont confirmées par

les données établies à partir des matériaux recueillis dans les forages bordant le fossé de la Bresse. Des valeurs aussi basses avaient déjà été proposées par Jean GOGUEL en 1943 dans ses études théoriques sur le charriage du Jura. Des conditions de frottement semblables, légèrement plus sévères doivent

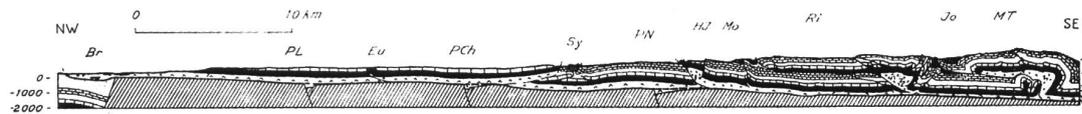


Fig. 73 : Coupe géologique du Mont Tendre (Jura vaudois) au Fossé de la Bresse en passant par les Plateaux et les Faisceaux du Jura externe. Déformations engendrées par les sauts d'altitude provoqués par les failles du socle dans la couverture charriée. Extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1965, p. 297.

être également admises au niveau des formations triasiques présentes à la base du charriage du Bassin molassique; là aussi, elles conduisent à admettre la possibilité de charriages actifs à ce niveau.

Les profils établis des Alpes au Jura montrent qu'en fonction des faibles coefficients de friction présents dans les couches triasiques qui s'étendent en continuité des Alpes au Jura, l'ensemble des assises placées au-dessus de ces niveaux se trouvent dans une situation d'instabilité favorisant la rotation et le déplacement de cet ensemble en direction du nord-ouest, permettant à la partie frontale du charriage de gravir la relativement modeste rampe conduisant au Jura (fig. 73). À la fin de l'époque tertiaire, le soulèvement des Massifs cristallins externes de la zone alpine et les charriages qui affectent ce secteur ont également pu contribuer à augmenter la surcharge et ainsi à favoriser la rotation à l'arrière de cet ensemble et sa progression vers la Bresse.

Dans la partie finale de cette contribution, H. P. Laubscher examine les accidents qui sont provoqués dans la couverture charriée, au moment où elle rencontre les aspérités de la surface du socle. La figuration présentée (fig. 74a) illustre les déformations engendrées par les sauts d'altitude provoqués par les failles du socle. En fonction de la direction du déplacement de la couverture, ceux-ci peuvent être considérés comme négatifs (chute) ou positifs (obstacle); dans ce dernier cas, un ou des cisaillements se produisent au niveau de la couverture (fig. 74b) avec la formation de rampes qui par cisaillement tendent à atténuer les marches en escalier du socle (fig. 74e); dans la plupart des cas cependant, ce type de confrontation conduit au développement d'accidents de type anticlinal (fig. 74c et d). Lorsque la couverture s'étend au-delà de marches d'escalier négatives, on assiste à un fractionnement de la couverture en blocs partiellement dispersés dont plusieurs exemples sont signalés le long de la bordure de la Bresse ainsi qu'à l'avant des charriages du Jura oriental.

Dans sa contribution, « *Some overall aspects of the Jura Dynamics* » (LAUBSCHER, 1972), l'auteur ne reprend pas sa proposition considérant que l'ensemble du Jura résulte d'une rotation antihoraire. Il aborde les déformations présentes dans le Jura par l'étude des contraintes en se rapportant aux effets des grands décrochements dans une modélisation où le Jura est lié à l'action d'un piston rigide, représenté par la progression du Bassin molassique en direction du nord-ouest. Il souligne l'importance des décrochements pour rendre compte des plis du Jura et de ceux d'autres chaînes, une solution que Nazario PAVONI (1929-2014) en 1961 venait de développer (voir Tectonique, chapitre 8.2.2.).

H. P. Laubscher ne commente pas immédiatement les propositions de N. Pavoni, mais il accorde une attention soutenue aux décrochements présents dans le Jura en les plaçant dans le cadre du plissement de la chaîne. L'analyse de ces systèmes lui permet de dresser l'état général des contraintes liées aux déformations ayant accompagné le plissement de la couverture (fig. 75). Il innove en superposant le régime des contraintes du plissement tardi-miocène sur le schéma de la structuration oligocène qui a accompagné la subsidence du Fossé rhénan, de la Bresse et des régions voisines par ses failles normales méridiennes. Il en résulte le schéma des structures héritées de la poussée alpine tardi-tertiaire avec le chevauchement de la couverture, ses plis et ses décrochements.

Il montre que la géométrie régionale des structures de la chaîne acquise durant le Pontien tardif est avant tout dépendante du nouveau régime de contrainte, mais est aussi influencée par les structures héritées de l'extension oligocène qui se présentent avec des angles variables face aux directions des nouvelles contraintes. Dans les régions nord et nord-est, la direction des décrochements sénestres

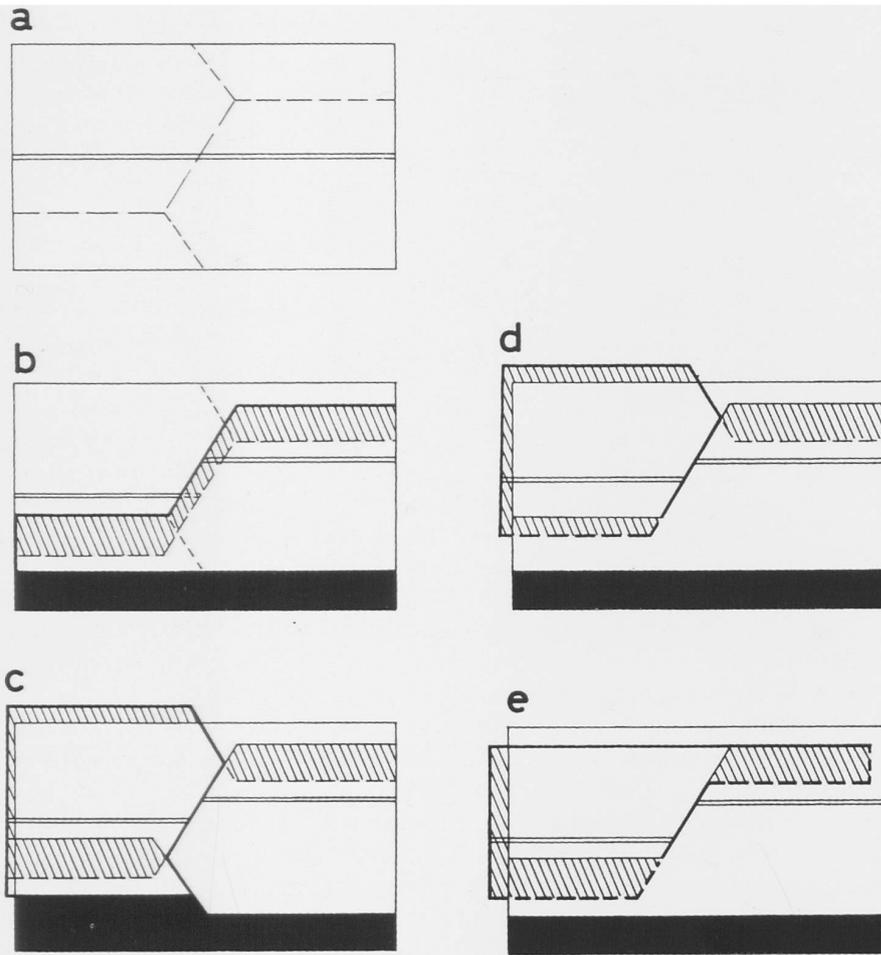


Fig. 74 : Schémas théoriques des déplacements de blocs extraits de H.-P. LAUBSCHER en 1965, p. 303. Élimination de zones de recouvrement le long de décrochements obliques par rapport à la direction de mouvement du bloc. Cas de translation simple. Trait double: trait préliminaire (avant déformation); hachures: cuvette (recouvrement); en noir: source, dans le sens de zone positive (lacune); trait gras: bloc actuellement actif; tireté (dans zones chevauchées): limite du bloc inférieur.

coïncide avec la direction des failles héritées; au sud-ouest, les anciennes failles se trouvent être à peu près parallèles à celles des nouveaux charriages; entre ces deux situations, les trajectoires des anciennes failles présentent une tendance à la compression.

Dans l'article « *Viscous components in Jura folding* » (LAUBSCHER, 1975), l'auteur remarque tout d'abord que la déformation de cette chaîne s'est faite dans des conditions de faible couverture, donc de basses températures. Il est donc normal

que le style tectonique soit dominé par celui de la fracturation avec des cisaillements au niveau de surfaces discrètes et la formation de charriages, de failles et de plis chevauchants; on doit cependant admettre que le plissement des roches du Jura comporte encore d'autres phénomènes rhéologiques, mais leurs effets sur la déformation des roches du Jura restent alors encore mal connus par manque d'observations précises et du fait que les données expérimentales sur la déformation des

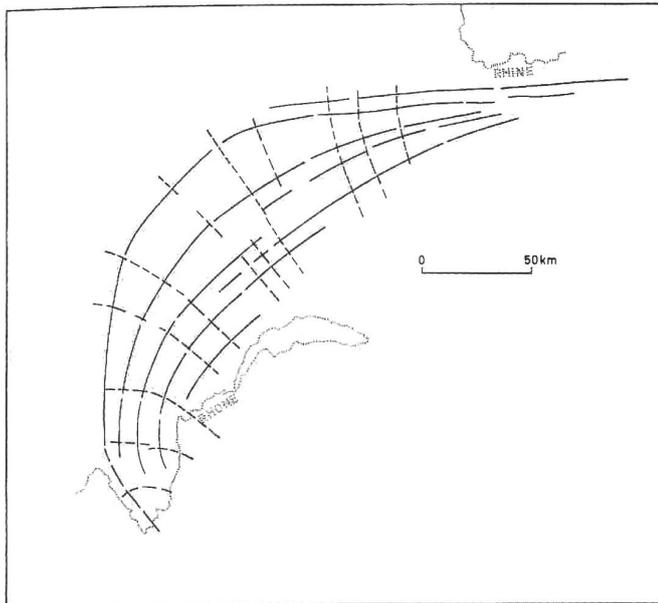


Fig. 75 : État général des contraintes liées aux déformations ayant accompagné le plissement de la couverture. Extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1972.

roches ne sont pas encore disponibles. Désireux de faire l'état des connaissances sur ces questions, l'auteur s'attache à présenter deux phénomènes qui, à ses yeux, sont trop négligés alors qu'ils jouent un rôle important dans le plissement des roches du Jura. Tous deux peuvent être désignés comme « visqueux » : ils concernent la déformation des niveaux d'anhydrites triasiques et la genèse des stylolites tectoniques dans les calcaires du Jurassique. Bien que ce dernier phénomène, résultant de la dissolution sous pression, ne puisse pas en toute rigueur être assimilé à la déformation visqueuse ou plastique, l'auteur prend cette liberté du fait que des déformations associées à ce phénomène – fracturation et recristallisation – peuvent conduire à des structures s'apparentant à celles de déformations à l'état visqueux. Alors que trois illustrations éloquentes présentent les déformations « visqueuses » des niveaux d'anhydrite (figures 3 à 5, pages 248, 249, 250, in LAUBSCHER, 1975), aucune figure n'illustre les déformations visqueuses accompagnant les stylolites. Pour H. P. Laubscher, les deux types de déformations « visqueuses » sont le résultat de phénomènes de dissolution-recristallisation.

L'auteur souligne l'importance de la déformation conduisant à la création de fractures et de nouveaux pores, un facteur essentiel pour assurer et maintenir des ouvertures de transport permettant la mobilité des solutions. La fracturation est accompagnée par une légère dilatance¹ et permet de maintenir des échanges avec les films aqueux présents à la surface des grains en contact avec les pores et les fissures. Pour l'auteur, dans les plis du Jura, les déplacements de matière liés à ces phénomènes restent modestes, dépassant rarement 10 % ; ceux-ci se limitent à des transports vers des sites très voisins. Une figure (figure 6, page 251, in LAUBSCHER, 1975) illustre la répartition des déformations dans le cadre d'un pli coiffé ; elles sont particulièrement intenses au niveau des charnières et le long des flancs redressés marqués par des glissements de couche qui peuvent être considérés comme des *kink bands*² s'élevant jusqu'au niveau des charnières arrondies, là où s'observent localement de véritables brèches tectoniques ; les couches externes aux plis sont peu affectées par la déformation, elles sont surtout marquées par des stylolites horizontaux, accompagnés par des figures de tension et de petits charriages. Des estimations préliminaires conduisent à admettre que les déformations visqueuses liées aux stylolites sont quantitativement négligeables bien qu'elles paraissent jouer un rôle fondamental en favorisant le plissement des assises évaporitiques et surtout en y favorisant la formation de décollements.

7. 2. 2. De 1973 à 1983

Dans l'article « *Faltenjura und Rheingraben: zwei Großstrukturen stoßen zusammen* », (LAUBSCHER, 1973a) l'auteur cherche, dans le cadre d'une présentation didactique, à exposer les conditions qui ont précédé et accompagné, au front de la chaîne alpine, la rencontre des deux structures

¹ Le phénomène de dilatance d'un sol décrit la variation de volume que l'on observe dans les matériaux granulaires lorsqu'ils sont soumis à un cisaillement. Cet effet a été décrit scientifiquement pour la première fois par Osborne Reynolds en 1885-1886 (source Wikipédia).

² Littéralement « bandes en genou ». Ces « bandes froissées » particulières correspondent à l'association de deux flexures très anguleuses, le long d'une bande relativement étroite (par rapport à sa longueur), qui traverse obliquement un empilement de feuillets (strates d'épaisseur régulière, schistosité) (source geol-alp.com).

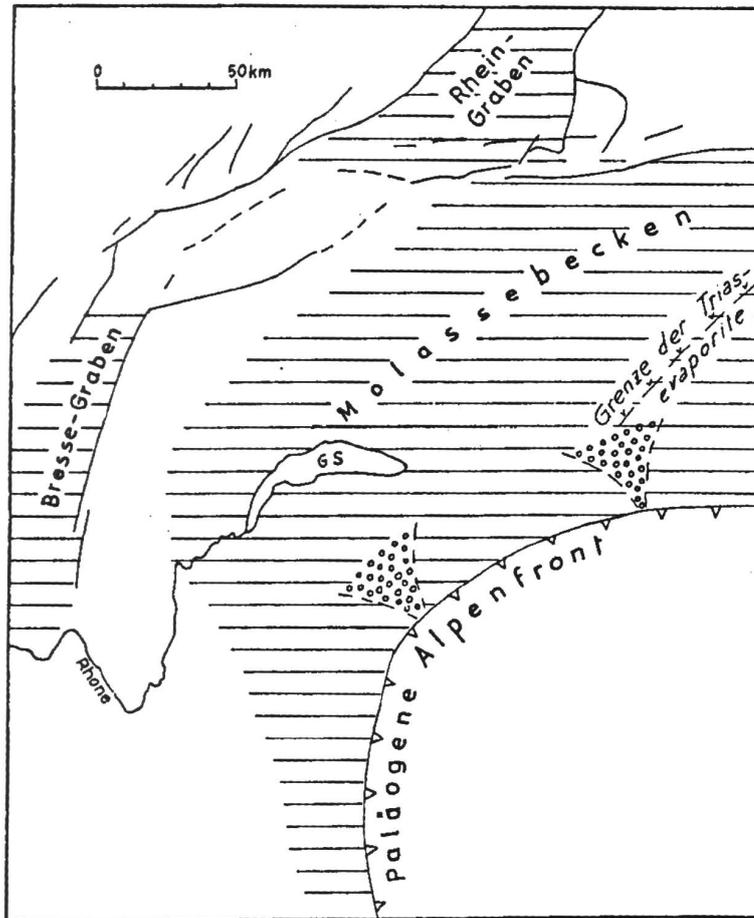


Fig. 76 : Carte paléotectonique de l'évolution des paysages à l'avant de l'édifice alpin à l'Oligocène supérieur extraite de H.-P. LAUBSCHER en 1973a.

géologiques importantes de ce secteur, le Jura et le Fossé rhénan. Il accorde une attention spéciale à l'ampleur des déplacements qui accompagnent cette évolution à la faveur de charriages et de la subsidence.

Deux cartes paléotectoniques permettent de situer les grands traits de l'évolution des domaines géographiques à l'avant de l'édifice alpin. La figure 76 (LAUBSCHER, 1973a, p. 146) souligne la large étendue du Bassin molassique de l'Oligocène supérieur, en direction du nord-ouest. Il mord par de minces dépôts sur une bonne partie du futur Jura, créant une connexion passagère avec le Fossé rhénan alors que le Bassin

de la Bresse suit une évolution indépendante. En direction de la chaîne alpine, la puissance de ces dépôts s'accroît par l'accentuation de la subsidence et d'importants dépôts deltaïques s'accumulent au front des charriages. La carte schématique figure 77 (LAUBSCHER, 1973a, p. 147) donne la position des éléments structuraux après la phase de plissement alpin néogène, marquant la forte réduction du Bassin molassique liée au soulèvement du Jura et aux écaillages et plissements de sa zone méridionale. Deux coupes allant des Massifs cristallins externes au Bassin de la Bresse illustrent cette évolution en permettant la comparaison des structures présentes au front

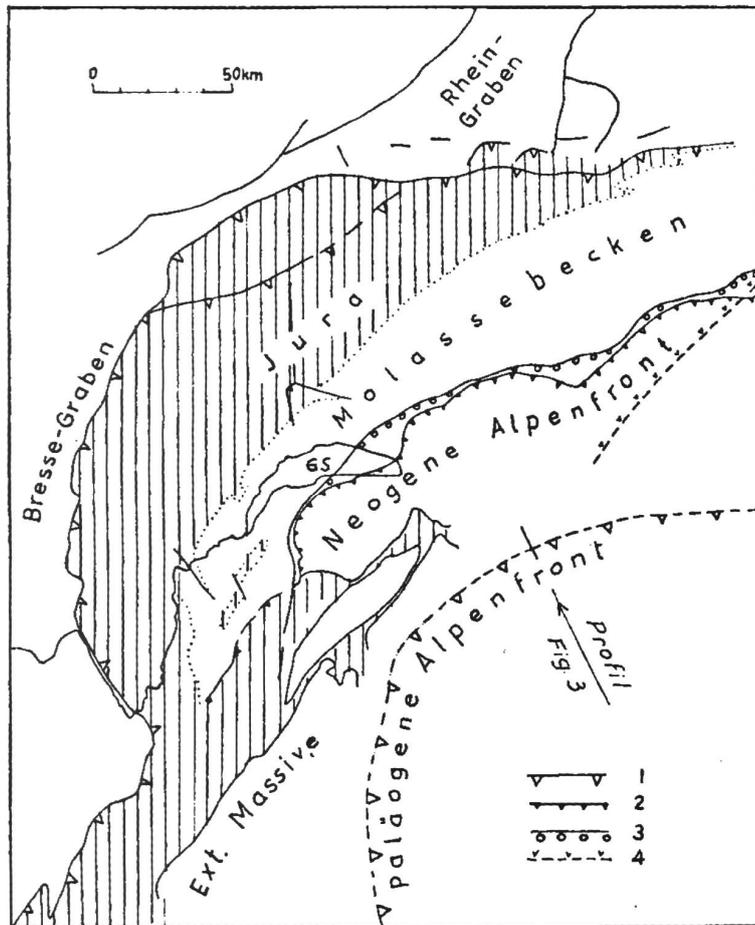


Fig. 77 : Carte schématique des éléments structuraux après la phase de plissement alpin néogène extraite de H.-P. LAUBSCHER en 1973a.
Tectonique de la région représentée dans la fig. 76 après la phase néogène du plissement des Alpes. Hachures verticales : chaînes subalpines de la France et du Jura.

des Alpes à l'Oligocène supérieur, à celles qui furent acquises au Tertiaire supérieur après le plissement du Jura. La comparaison des cartes (fig. 76 et 77) fait bien ressortir le parallélisme entre la courbure du Jura occidental au niveau de la Bresse et celle du front des Alpes occidentales tandis que l'orientation ouest-est du Jura oriental, marqué par la ligne Mont Terri – Lägern, suit l'orientation des Alpes centrales. La concordance de ces alignements souligne l'appartenance du Jura à l'édifice alpin.

Pour H. P. Laubscher, c'est aussi l'occasion de montrer que le Jura peut être présenté comme le disciple avancé de l'orogénèse alpine. Bien au sud de cette marge, au front de charriage s'est développée une auge subsidente allongée qui, au cours du temps, s'éloigne vers l'extérieur sans que son influence dépasse la zone du Jura représentée par sa mince couverture qui s'avance en se déformant lorsqu'elle rencontre des aspérités avant de parvenir au niveau de la bordure de la Bresse où l'on observe une subsidence de près de 3 km. Au

niveau de Bâle, la subsidence rhénane n'a pas, et de loin, la même ampleur, et en conséquence la limite de la chaîne y est beaucoup moins nette. À ce niveau, les éléments qui s'affrontent sont de caractères très différents. Le Bassin molassique peut être désigné comme un mur avancé au-delà des structures.

H. P. Laubscher rappelle que dans le Jura et dans son avant-pays septentrional, les données stratigraphiques permettent de suivre des traces de subsidence de l'Éocène à nos jours. Les dépôts détritiques discordants pontiens, antérieurs au plissement du Jura, déposés par des rivières de la Forêt-Noire et des Vosges, ont parfois été considérés comme étant les premières manifestations du plissement du Jura; dans cette perspective, ce dernier devient associé à une tectonique de son socle autochtone alors que ces manifestations étrangères au plissement du Jura sont liées au pli profond qui a soulevé la zone méridionale du Fossé rhénan avec les Vosges et la Forêt-Noire. Pour H. P. Laubscher, le plissement du Jura n'a été actif que dans une très courte période de la fin du Tertiaire, en se prolongeant probablement pendant moins d'un million d'années par des charriages situant la grande instabilité qui affecte alors la mince couverture sédimentaire de la zone frontale de l'orogénèse alpine. Ce ne fut qu'un «*Strohfeuer (feu de paille)*». Dans ces régions, le sous-sol gronde depuis plus de 40 millions d'années aussi bien dans les zones de la Molasse que dans celles du Fossé rhénan. La différence de contexte tectonique ne s'exprime pas seulement par la durée mais également par les vitesses d'évolution. Dans le Jura, l'avancée de 20 à 30 km s'est faite en peu de temps avec des vitesses de plusieurs centimètres par an, tout au contraire de l'évolution du Fossé du Rhin, longue de 40 millions d'années, qui a été accompagnée par une subsidence et un écartement marqués par des vitesses annuelles de 1/10 mm. Pour l'auteur, depuis longtemps, le Jura se trouve au repos mais des mouvements tectoniques y sont encore actifs en se manifestant par des tremblements de terre sans que ceux-ci puissent être associés à la formation de plis de chevauchements ou de décrochements.

L'article «*Grundsätzliches zur Tektonik des Rheingrabens*» (LAUBSCHER, 1970) et celui intitulé

«*Die Südostdecke des Rheingrabens: ein kinematisches und dynamisches Problem*» (LAUBSCHER, 1982) sont consacrés à comparer les structures de la couverture sédimentaire de la Forêt-Noire avec celles des régions avoisinantes au niveau du Fossé du Rhin à l'ouest de sa bordure avec le Jura. Par cette proximité, il paraît nécessaire d'évoquer ensemble ces documents.

De l'article de 1970, on retiendra surtout la figure illustrant la zone de transfert Rhin-Bresse qui, de Bâle en direction de l'est, se trouve associée à la ligne Mont Terri, marquant la limite entre le Jura plissé au sud, et le Jura tabulaire et la Forêt-Noire au nord. La contribution de 1982 présente les grandes lignes, mais aussi des détails, de l'évolution structurale de la partie méridionale du Fossé rhénan et de sa bordure sud-est avec la Forêt-Noire où une attention spéciale est accordée aux vicissitudes structurales que les failles tertiaires engendrent dans les lambeaux de couverture mésozoïque présents à la surface de ce massif hercynien formant le socle.

Les principaux traits structuraux et l'évolution de ce secteur bordant le Jura sont illustrés par six croquis (fig. 78) allant de l'Éocène à l'Oligocène. Ce document est complété par quatre coupes (fig. 79) ouest-est donnant une schématisation de l'évolution de la couverture au niveau de la localité d'Allschwil située au-delà des faubourgs ouest de Bâle. Sous l'effet de la flexure rhénane orientale du Fossé du Rhin, la couverture sédimentaire triasique dans le secteur du Dinkelberg (extrémité sud-ouest de la Forêt-Noire) présente une suite de petits grabens et horsts en coin, d'orientation méridienne qui, en profondeur, ne s'étendent pas au-delà du groupe de l'anhydrite du Muschelkalk. Leur origine est mise en parallèle avec les extensions créées par la subsidence associée à la flexure rhénane (environ 1000 m) et par la légère pente à l'ouest, puis à l'est, que subit ce secteur durant l'Oligocène: ces événements conduisent à l'étirement de la partie supérieure de cette couverture qui, sous l'effet de la gravité, glisse sur les niveaux sous-jacents d'halite du Muschelkalk (fig. 79, b, c, d et fig. 78, e, f). L'anticlinal d'Adlerhof de direction est-ouest, situé dans le Jura tabulaire au sud du Rhin, est également considéré comme étant une structure dépendante des glissements gravitaires de la couverture et ne paraît pas être associé au plissement

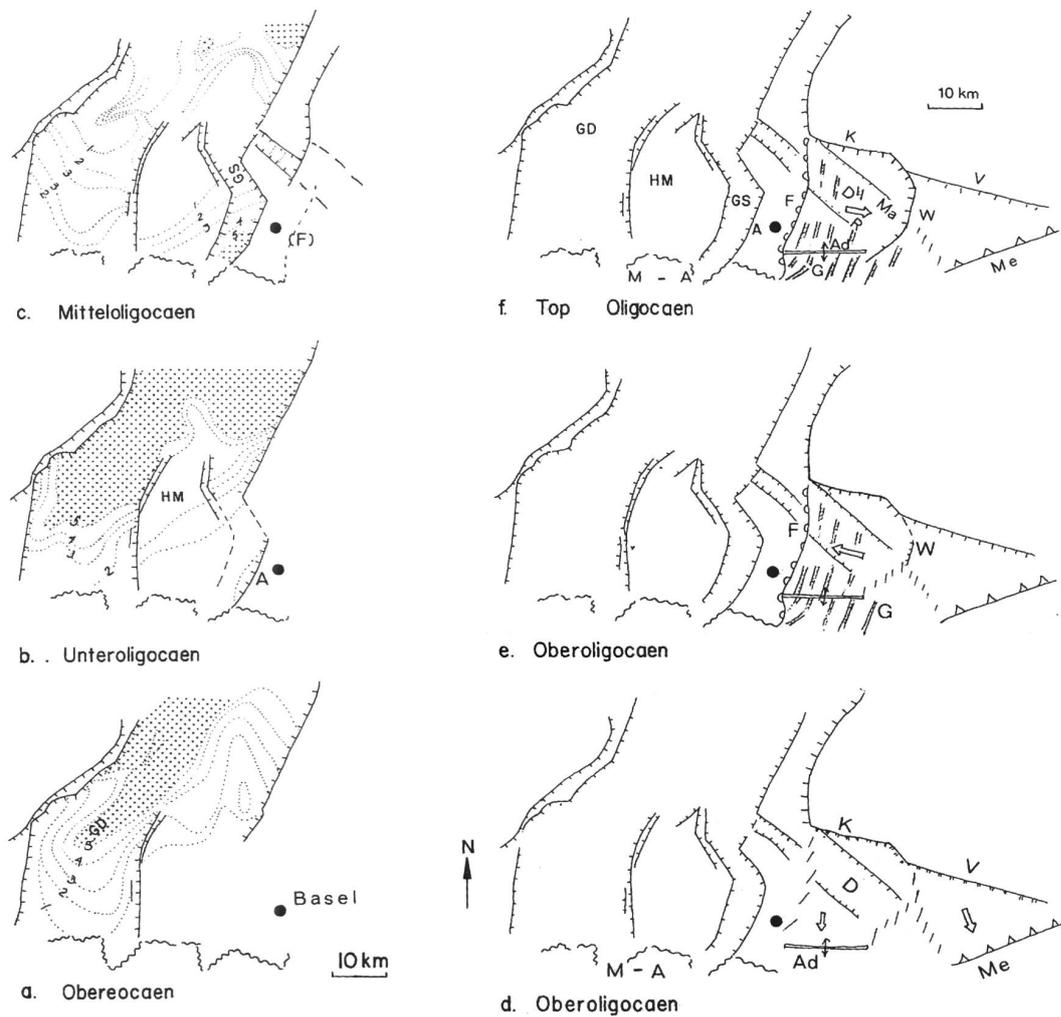


Fig. 78 : Évolution structurale de la partie méridionale du Fossé rhénan et de sa bordure sud-est avec la Forêt-Noire. Extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1982.

Développement de la bordure sud du Fossé rhénan au Paléogène, extrait de carte simplifiée d'après Doeble (1970).

Courbes pointillées : isopaches, équidistance 100 m. Lignes ondulées : zone de flexure de Montbéliard-Aesch.

Éléments tectoniques : GD = fossé de Dannemarie, HM = horst (compartiment soulevé) de Mulhouse, GS = fossé de Sierentz-Wollschwiller, A = zone de fractures d'Allschwil, F = flexure de Bâle (flexure du Fossé rhénan), M-A = zone de flexure de Montbéliard-Aesch, Ad = voûte d'Adlerhof, Me = chevauchement de Mettau, D = fracture du Dinkelberg, G = fossés du Jura tabulaire, W = fracture du Wehratal, R = fracture de Rheinfelden, Ma = fracture du Maulburg. Les flèches indiquent l'inclinaison pour l'intervalle de temps mentionné.

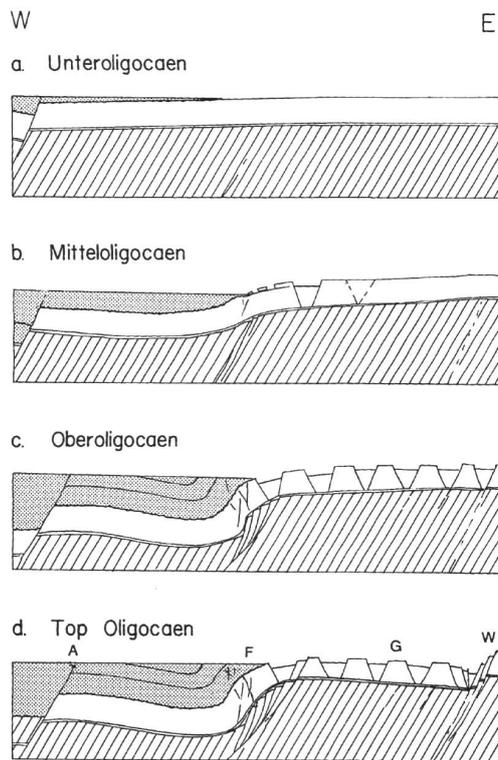


Fig. 79 : Schématisation de l'évolution de la couverture au niveau de la localité d'Allschwil située au-delà des faubourgs ouest de Bâle extraite de H.-P. LAUBSCHER en 1982. A= Zone de fracture d'Allschwil, F = Flexure, G = Fossés du Jura tabulaire (Dinkelberg), W = Zone de fracture de la vallée de la Wehra.

tardi-tertiaire, comme son orientation pourrait le faire penser. D'autres plis de ce secteur oriental du Jura tabulaire, dont le chevauchement de Mettau avec un déversement au sud (fig. 80) et celui de Mandach paraissent également être des structures liées aux effets de la gravité bien qu'elles se manifestent sur des pentes peu inclinées, grâce à la grande mobilité des couches de sel (NaCl) du Muschelkalk.

À l'époque où la tectonique de gravité est souvent évoquée pour rendre compte des structures présentes dans les chaînes de montagnes dans les Alpes (LUGEON & GAGNEBIN, 1941) et dans le Jura, (William G. PIERCE (1904-1994), 1966; AUBERT, 1945; GLANGEAUD, 1949b), H. P. Laubscher fait part de sa position sur ce sujet dans l'article qu'il publie dans le cadre d'un ouvrage consacré aux

différentes manifestations de la tectonique de gravité (LAUBSCHER, 1973b). Pour l'auteur, si la tectonique de gravité peut expliquer des glissements localisés, associés aux profondes érosions dont celles observées au niveau de certains anticlinaux du Jura, elle n'est pas appropriée pour rendre compte du charriage de l'ensemble de la couverture et de son plissement. La reconstitution de l'évolution des déformations majeures situées au front des Alpes centrales entre les Massifs cristallins externes et le Jura, lui permet de figurer la position et la géométrie des zones de charriages majeurs depuis leur position dans le socle au sud, jusqu'à l'émergence de ces surfaces de cisaillement à l'avant du prisme alpin charrié, situé au nord. Les raccourcissements structuraux affectant les zones externes des Alpes centrales finissent par atteindre le niveau du Bassin molassique puis finalement celui du Jura. Une schématisation majeure (fig. 81) permet à l'auteur d'illustrer le cisaillement frontal et l'avancée de cette zone en coin charriée au front des Alpes. L'évolution de ces structures a été accompagnée de mouvements laminaires et rotationnels. Les premiers qui ont été nécessaires à l'avancée des zones frontales sont le plus souvent associés à des niveaux évaporitiques ou à d'importantes couches argileuses. Les zones profondes (zones helvétique et pennique) présentent de fréquents plis couchés à flancs inverses où des rotations de couches se sont produites au niveau des charnières qui, ainsi, jouent un rôle important dans le transport du prisme chevauchant. H. P. Laubscher juge que cette fonction accompagne également les déformations des assises évaporitiques situées sous le charriage du Jura, comme le prouvent les fréquents plis couchés qui ont pu être observés dans les affleurements de bonne qualité des exploitations de gypse et dans ceux rencontrés lors du récent percement du tunnel routier.

« *Geometrical adjustments during rotation of a Jura fold limb* » (LAUBSCHER, 1976) est une contribution qui s'inscrit dans la suite des observations de 1975 faites par l'auteur dans le flanc redressé d'un anticlinal (fig. 6, p. 251 in LAUBSCHER, 1975) où, comme dans le reste du Jura, la déformation s'est produite dans des conditions de basse température et de basse pression et où le plissement des assises calcaires a été accompagné par des

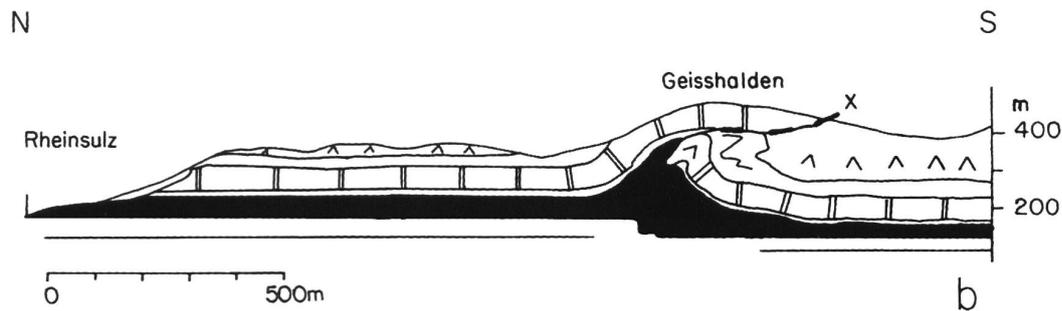


Fig. 80 : Chevauchement de Mettau avec un déversement au sud. Extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1982.

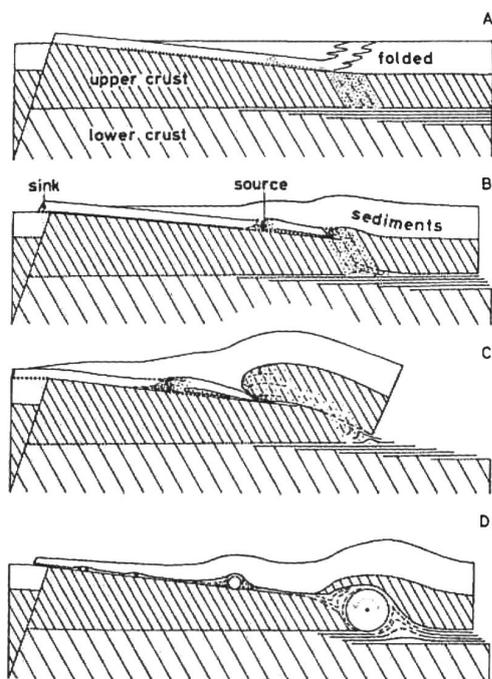


Fig. 81 : Schématisation illustrant le cisaillement frontal et l'avancée en coin charriée au front des Alpes. Tiré de H.-P. LAUBSCHER en 1973b extrait de *Jura Mountains*.

fracturations, translations et rotations de blocs rigides limitées par des plans de stratification et de cassures. Ces phénomènes sont également accompagnés par de la dissolution sous pression et des recristallisations dans des vides où règnent de basses pressions. H. P. Laubscher est conscient

que, dans le Jura, les conditions d'affleurement n'ont que rarement des qualités suffisantes pour saisir tous les détails de l'évolution de la déformation; il aborde donc celles-ci de manière schématique et globale en s'inspirant d'observations locales illustrées par la photographie; il transpose ces données obtenues dans des schématisations géométriques représentant la déformation dans des plans perpendiculaires à la direction axiale des plis. Dans le Jura, à la base des séries plastiques où se situe l'amorce des plis, les couches du grès bigarré du Trias sont trop rigides pour permettre la migration de matière vers le bas; il se forme, au-dessus de ces niveaux, un coussin de matière plastique qui tend à soulever l'ensemble de la structure en formation. Examinant le détail des déformations associées, l'auteur donne sa préférence à celles où l'accommodement entre les surfaces des différents blocs se trouve accompagné par des kink-bands où les couches subissent un ploiement rotationnel favorisé par la dissolution sous pression, mais sans que les détails de cette évolution soient spécialement illustrés pour en suivre le développement.

H. P. Laubscher part des données de Kurt Lemcke (1914-2003) qui a illustré par des isohypses le soulèvement des dépôts molassiques marins du pied des Alpes de la Suisse orientale et des régions situées plus à l'est (LEMCKE, 1974); il complète ces données par celles qu'il recueille dans le Bassin molassique de la Suisse occidentale, dans la bordure de la Bresse et dans le Jura situé au sud de Bâle (fig. 82). Dans cette dernière région, les isohypses illustrant le soulèvement, présentent un fort gradient et une orientation ouest-est, parallèle à la

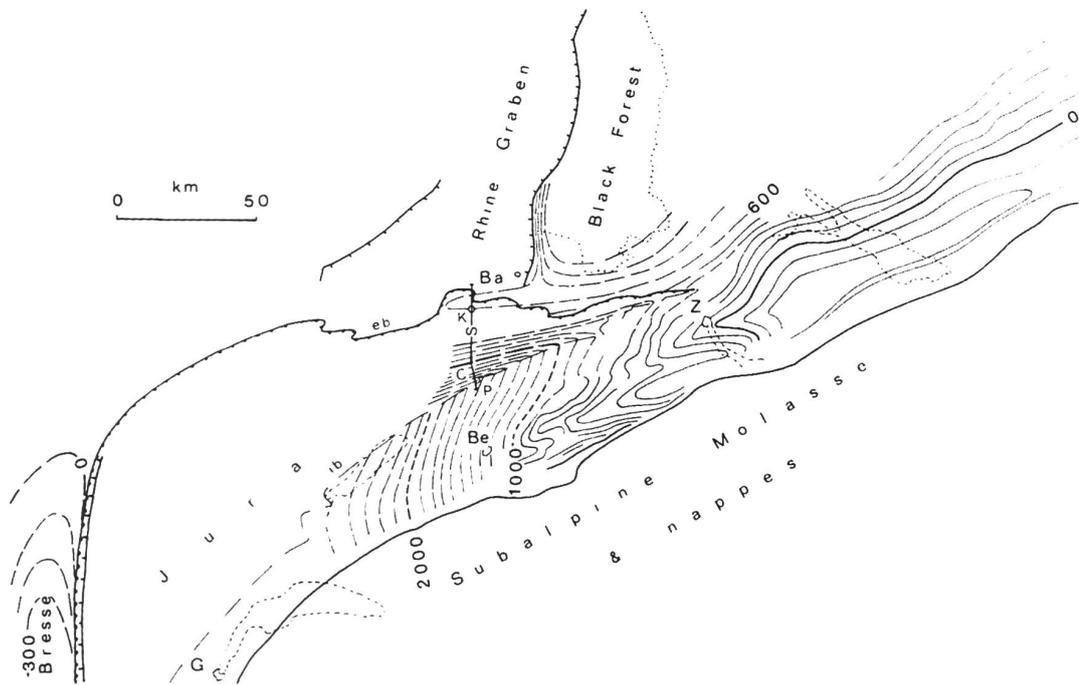


Fig. 82 : Bassin molassique de la Suisse occidentale, dans la bordure de la Bresse et dans le Jura situé au sud de Bâle extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1974. Les courbes en mètres montrent l'altitude actuelle du toit de la Molasse marine miocène. Ceci correspond au soulèvement total depuis le dépôt qui était proche du niveau de la mer.

bordure du Jura, fort différente de celles présentes dans les autres parties du Bassin molassique. On note que le principal changement d'orientation des isohypses se situe au passage entre le Bassin molassique et le Jura. H. P. Laubscher montre que

« le soulèvement post-Miocène des sédiments tertiaires du Bassin molassique et des zones adjacentes septentrionales résultent de la superposition de deux effets très différents : d'une part de vrais mouvements du socle affectant l'ensemble de la région, avec des soulèvements modestes (quelques centaines de mètres) alors que d'autre part le décollement qui se produit au-dessus d'un socle stationnaire conduit à un soulèvement en fonction de la compression qui dans le Jura et son arrière-pays atteint des valeurs supérieures à 2 km [...] ces mouvements sont dépendants de la superposition de deux processus tectoniques : l'un d'eux, lent, associé au faible plissement du Bassin molassique septentrional, alors que l'autre rapide et intense est lié au mouvement épidermique

du Jura. Le premier, actif durant tout le Tertiaire se manifestant encore actuellement par de fréquents tremblements de terre au niveau du socle, alors que le second dont l'activité n'a probablement pas dépassé un million d'années est mort depuis près de 5 millions d'années. » (LAUBSCHER, 1974, p. 536).

Pour H. P. Laubscher, les données de K. Lemcke s'accordent parfaitement avec ses propres travaux sur le Jura (LAUBSCHER, 1961, 1965, 1967) et il est bien difficile d'expliquer ces faits par une autre idée que celle de la théorie d'un charriage de couverture (*thin-skinned thrusting and folding*).

H. P. Laubscher débute son article « *Fold development in the Jura* » (LAUBSCHER, 1977a) en reconnaissant que la notion de plissement est un terme collectif qui recouvre un large éventail de processus dont une large majorité sont encore mal compris malgré les nombreuses études et analyses leur ayant été consacrées. Les plis du Jura, bien

que d'allure simple, sont le résultat de nombreux processus actifs à différentes échelles; ils ne font pas exception à la constatation préliminaire de cette analyse et il est important de souligner qu'ils ne sont ni sinusoïdaux, ni périodiques, ni cylindriques. Leur représentation par des kink-bands avec des charnières arrondies en assure certainement la meilleure image. Charriage et formation des kink-bands correspondent pratiquement aux mêmes seuils d'instabilité; la formation des kink-bands est très souvent associée aux charriages. Pour suivre l'évolution de ces phénomènes, l'auteur s'appuie sur les profils du Hauenstein de A. Buxtorf de 1916. Ce travail montre que les charriages et les plis embryonnaires présents dans la zone frontale du Jura oriental sont associés à des accidents du socle (failles ou flexures) situés sous la zone de décollement; de là, ils s'étendent vers le haut en suivant des assises incompétentes, en assurant des décollements secondaires où se développent, avant qu'ils ne gagnent la surface, de nouvelles instabilités (plissement disharmonique). Les plis embryonnaires secondaires sont le plus souvent étroits; ils s'unissent assez souvent avec d'autres zones de kink-bands en progressant en direction du décollement de base. L'auteur analyse l'évolution du pli embryonnaire du Sprüssel situé à l'avant du charriage principal de cette zone. L'illustration de A. Buxtorf (LAUBSCHER, 1977a, fig. 3, p. 343) est remplacée par une nouvelle figure schématique de cet accident (fig. 4, p. 343) en y traçant la position des différentes zones de kink-bands et des charriages (fig. 5, p. 344) en permettant d'en suivre l'évolution par la figuration des zones d'instabilité qui s'y développent. La figure 7 (p. 349) représente la solution proposée par H. P. Laubscher pour quelques détails de la structure de Sprüssel (voir fig. 85, p. 205) avec ces zones de kink-bands (traits pointillés), ses charriages, (traits discontinus avec x) et les coussins de matériaux ductiles. H. P. Laubscher présente également un certain nombre de structures reconnues dans le Jura par d'autres chercheurs en les habillant des structures de kink-bands et de charriages (LAUBSCHER, 1977a, fig. 11 et 12, p. 353 et fig. 13 et 14. p. 354). L'article «*Foreland folding*» (LAUBSCHER, 1978), illustre par deux coupes générales les structures de la chaîne alpine, l'une s'étendant de la région de Milan à Bâle, la seconde traversant la chaîne de Venise aux

environs de Munich afin de souligner les particularités structurales de l'avant-pays alpin et de toucher à quelques analogies tout en faisant ressortir quelques importantes différences. À l'ouest, la zone frontale est marquée par la présence des niveaux évaporitiques du Trias qui permettent le déplacement vers le nord du Bassin molassique et du Jura dont le chevauchement s'avance jusqu'au niveau des Bassins tertiaires de la Bresse et du Fossé rhénan, des structures dont le façonnement chronologique paraît être intimement rattaché aux structures du front alpin comme l'est le bombement de socle hercynien des Vosges et de la Forêt-Noire. À l'est, au niveau de la Bavière, l'absence de niveaux plastiques triasiques sous la Molasse n'a pas permis à ce vaste bassin frontal d'être déplacé vers le nord, pas plus qu'il n'a pu, au niveau de la bordure du massif de Bohême, entraîner la formation d'une zone de plissement comparable à celle du Jura. Ainsi les structures de l'avant-pays montrent la limite des analogies que peuvent présenter ces zones bordières malgré les alignements cylindriques qu'elles présentent localement. Dans cette contribution, l'auteur examine encore des modélisations de l'état des contraintes dans l'ensemble de la croûte de l'avant-pays alpin soumis aux effets de la déformation orogénique de la chaîne alpine et de son plongement dans le manteau. Ces développements trop éloignés du problème de Jura sont ici simplement mentionnés.

«*Die Entwicklung des Faltenjura – Daten und Vorstellungen*» (LAUBSCHER, 1980), examine et critique les différentes contributions qui, dans les dernières années, ont proposé de nouvelles hypothèses s'écartant sensiblement des propositions de A. Buxtorf et de l'auteur pour expliquer les particularités de la chaîne du Jura. Cette contribution débute par la présentation des données jugées fondamentales pour aborder cette démarche:

- 1) Toutes les données structurales observées en surface comme celles provenant des tunnels et des forages ne concernent que des roches des séries triasiques ou plus jeunes. Cet ensemble présente un comportement structural en disharmonie par rapport au socle sur lequel il s'étend.
- 2) Cette couverture plissée est raccourcie d'une façon linéaire depuis son extrémité orientale jusqu'à atteindre une valeur voisine de 30 km dans la zone centrale de la chaîne, des données qui seront encore précisées.

3) La chaîne est reliée aux Alpes par son arrière-pays, dans le sud-ouest. Du côté de son avant-pays, en dehors de faibles secteurs de structures charriées, elle est franchement marquée par les coupures de l'Île Crémieu, du fossé de la Bresse et de la bordure nord entre le Lomont et sa suite orientale. Ces derniers secteurs sont marqués par une tectonique de serrage pré-miocène avec de petites structures soulevées qui ont connu un comportement passif lors du plissement de la chaîne. Dans les zones de passages externes diffus comme dans les Avants Monts de Besançon, la compression est faible et sans grande importance.

4) Dans son ensemble, le Jura forme en direction du nord-ouest une structure convexe arquée qui, sur sa bordure externe au niveau de la Bresse surtout, ainsi que du Fossé rhénan, est marquée par une structuration précoce.

5) Le Jura est marqué par des décrochements présentant une grande régularité correspondant à des fractures de Mohr-Coulomb qui sont sans relation avec les structures de l'avant-pays. L'intensité de la compression au niveau de ces structures, de même que le déplacement enregistré, diminue des zones internes vers les zones externes. Dans les régions bien cartographiées, on constate que les décrochements sont associés à des chevauchements et à des plis.

6) Les failles de l'avant-pays ne sont pas la continuation cinématique des décrochements présents dans le Jura. Dans quelques zones, elles sont reprises par le plissement et les coudes et bourrelets qui se forment, demandant des études attentives.

7) Les divers faciès de molasses d'eau douce supérieure – *Juranagelfluth*, *Helicidenmergel* et calcaires d'eau douce – présents en de nombreux endroits à l'intérieur du Jura, mais rarement à l'extérieur de la chaîne, sont nettement affectés par le plissement. Les formations pontiennes, au moins leur base, ne sont que rarement présentes à l'extérieur où elles sont plissées. Des séries du Pliocène de la Bresse, assez mal datées, paraissent surmonter le charriage. Dans la zone du bassin du Rhin, les relations Pliocène-Quaternaire ne sont pas claires. De toute façon, le plissement du Jura a été marqué par une vitesse de compression de l'ordre de 1 cm/an, de dix à cent fois supérieure aux vitesses estimées pour les importants mouvements des structures tertiaires du Fossé rhénan.

8) Certaines conditions-cadres sont souvent rap-
 portées en relation avec le plissement du Jura. Le

système des fossés du Bassin Rhin-Bresse formé au Tertiaire ancien correspond à une contrainte majeure d'orientation NNE de grande importance régionale avec un élargissement orienté WNW. Dès le Miocène, la compression maximale prend une orientation NNW qui s'accorde assez bien avec la direction de la poussée moyenne du Jura et de son arrière-pays alpin. Les structures d'avant-pays correspondantes paraissent pourtant plus jeunes et semblent dévier depuis le sud du fossé du Rhin en direction du lac de Constance et du bord alpin, et d'éviter le Jura. La bordure nord du Bassin molassique est marquée par un basculement au sud qui affecte également le Jura où la surface du Miocène moyen de l'arrière-pays s'est trouvée soulevée de plus de 2000 m de façon proportionnelle à sa compression avec une augmentation linéaire depuis le Jura oriental.

Partant de l'observation que de nombreuses régions du Jura sont marquées de façon plus profonde par les charriages que par les plis, H. P. Laubscher dresse un inventaire des différentes manifestations de ces structures dans le cadre de la bordure du Jura au sud du Fossé rhénan, afin d'en préciser les différents aspects dans le cadre du chevauchement frontal du Jura (LAUBSCHER, 1981). Les recherches de la Nagra (voir Tectonique, chapitre 9.2.) dans le nord-est de la Suisse (sismique réflexion et forages) ont conduit à la mise en évidence d'un important graben permocarbonifère dans le socle de ces régions qui font l'objet de l'étude de H. P. Laubscher (LAUBSCHER, 1981). Les données obtenues peuvent être comparées à des structures de même âge et de même direction qui sont connues dans le socle hercynien de l'Europe allant du Massif central à des zones situées sous le Bassin molassique de la Suisse orientale et de la Bavière. L'auteur montre que, sous le Jura, les failles bordières de ces structures hercyniennes ont été réactivées au cours du Tertiaire inférieur en produisant des flexures, des failles et des plis de faible amplitude (100 à 300 mètres) qui paraissent associés à une zone transformante située entre le Fossé rhénan et le Bassin de la Bresse. Au cours du charriage et du décollement de la couverture du Jura, ces structures n'ont pas été actives mais ont fonctionné comme obstacles au glissement de la couverture où se sont produits les charriages. La flexure de Mandach (fig. 80, p. 199), de regard sud, située dans le Jura tabulaire, avec un

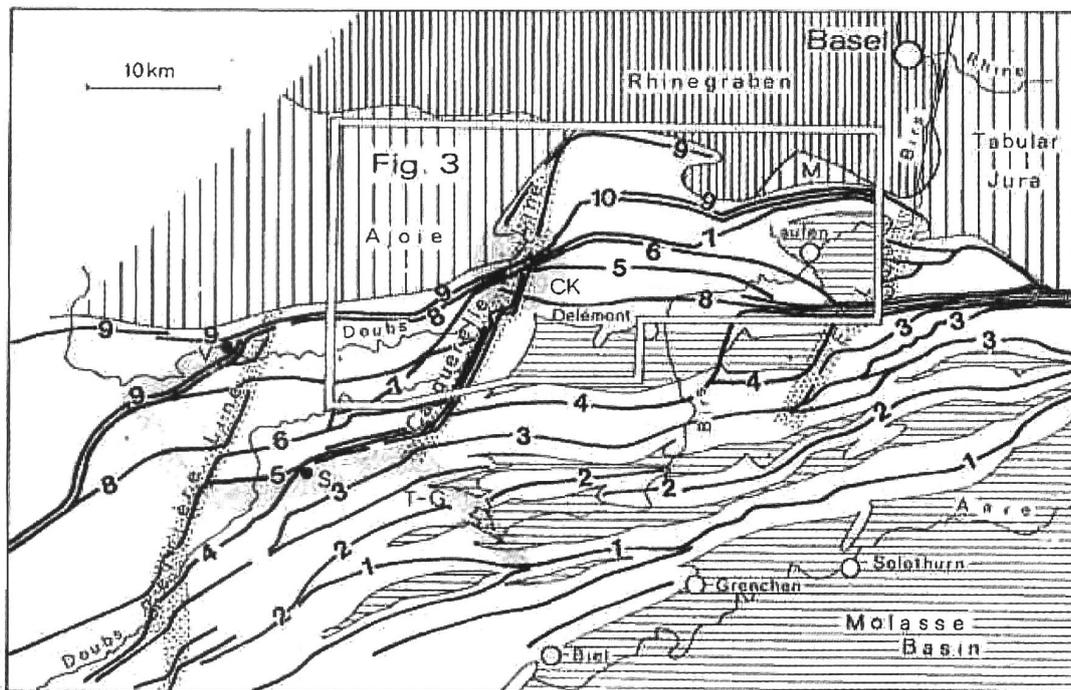


Fig. 83 : Zone frontale du Jura, au sud du fossé du Rhin, extraite de H.-P. LAUBSCHER en 1981, figure 1. Lignes verticales denses = Fossé du Rhin. Lignes verticales lâches = Jura tabulaire. Figuré de lignes horizontales : synclinaux et Bassin molassique. Traits soutenus (nombres de 1-10) : front de compression successif (rampes et plis anticlinaux). Figuré ombré et pointillé : principales zones de cisaillement le long de failles associées au Fossé rhénan. CK : nœud de la Caquerelle ; V = Vaufray ; S = Saignelégier ; T-G = Zone dextre de Tavannes-Les Genevez ; EL = Ligne d'Erschwil.

rejet de 300 mètres, paraît être l'une des plus simples de ces structures associées aux failles paléozoïques réactivées au Paléogène; elle forme, au niveau de la bordure septentrionale du bassin permocarbonifère, un plan de charriage incliné nord alors que ceux de ce secteur, actifs à plusieurs reprises, présentent des pendages au sud. Dans ce secteur du Jura oriental, les structures hercyniennes reconnues par la sismique semblent être présentes sur un large secteur de la chaîne, et même, peut-être, de l'Europe environnante.

Dans sa contribution de 1981, l'auteur suit en détail l'évolution structurale de la partie frontale du Jura charrié au sud du Fossé rhénan. Cette zone, déjà analysée par l'auteur lors de l'étude de profils transversaux (LAUBSCHER, 1977a), est abordée dans cette nouvelle publication principalement en fonction des données cartographiques qui révèlent l'importance des décrochements

dextres et sénestres. Les chevauchements s'y sont développés par concentrations de contraintes au niveau de la zone de décollement sur des failles oligocènes liées au graben du Rhin. En direction de la surface, ces zones de rupture évoluent souvent en zones de kink-bands pour former des plis et des charriages, non parallèles, donnant à l'ensemble un aspect assez discontinu. Dans cette zone où le bassin de Delémont, partie la plus méridionale du Fossé rhénan, s'est ainsi trouvé incorporé au Jura plissé avec des décrochements sénestres utilisant les failles du fossé comme plans de glissement, les traces de décrochements sénestres sont plus discrètes, cachées même; l'une de celles-ci, la zone de Tavannes-les-Genevez (T-G) de la figure 83 présente des regroupements de déformations à composantes dextres (failles et chevauchements). Leurs effets conduisent à la formation de plis et de chevauchements de traces arquées convexes au

nord qui rappellent la structure même de la chaîne et dont on retrouve les traces jusque dans des structures de faibles dimensions, le tout conduisant à une extension latérale des domaines affectés par ces structures. Ici aussi, comme dans la chaîne, les manifestations sénestres sont dominantes. Dans cet article, l'auteur présente une image saisissante du développement temporel des structures rencontrées sous la forme de six stades successifs de la progression vers le nord de cet ensemble structural en mettant en lumière la progression des charriages vers le nord et en soulignant qu'au-delà de certaines progressions, certains secteurs paraissent bloqués pour un temps (fig. 84). L'auteur admet que cette vision n'est probablement qu'une vision liée à la méthode d'analyse et que les déformations restent actives sur l'ensemble du secteur, mais qu'elles se concentrent à certains moments sur des secteurs spécifiques laissant des traces permettant d'établir une chronologie.

« *Überschiebungen im Jura* » (LAUBSCHER, 1983) focalise son attention sur l'étude des chevauchements au niveau de la chaîne. Pour l'auteur, ces accidents structuraux jouent souvent dans l'évolution du plissement de la chaîne un rôle plus important que le font les plis auxquels ils sont du reste fortement associés. Pour suivre leur genèse et leurs particularités, H. P. Laubscher reprend une nouvelle fois le profil nord-sud établi par A. BUXTORF (1916a) (fig. 85) lors du percement du tunnel du Hauenstein et y examine la géométrie et la genèse des charriages. En procédant du nord au sud, il constate que le premier charriage se situe au niveau de Fohrenweid (point 1) dans les assises subhorizontales du Jura tabulaire. Il est associé à une faible faille d'où se développe un charriage présentant un pendage au sud de 20°. Au niveau de Sprüssel (point 2), les plis en kink-bands marqués dans les assises de la couverture sédimentaire sont considérés représenter l'émergence d'une zone de charriage aveugle, qui aurait le même pendage que celui du point 1 ; bien que cet accident n'ait pas été reconnu lors des travaux, il paraît nécessaire pour rendre compte des structures en kink-bands présentes au point 2. Plus au sud, au point 3, le Jura plissé s'avance sur le Miocène du Jura tabulaire, en soulignant l'importance de ce charriage présentant des pendages situés entre 15 et 20° qui sont éga-

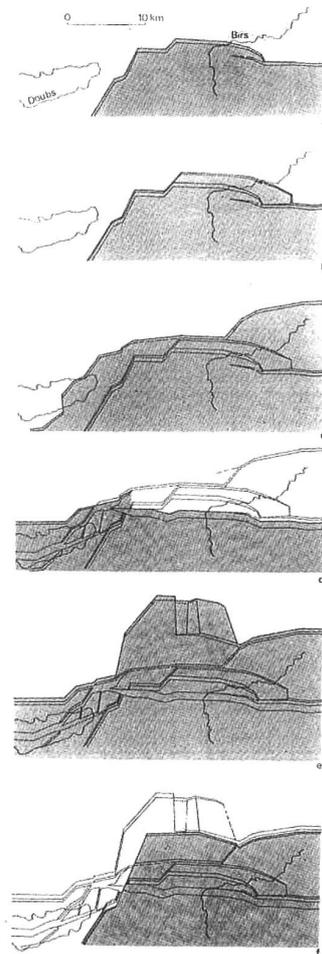


Fig. 84 : Séquence cinématique simplifiée de la progression du charriage du Jura en direction nord (plages grisées) dans la région du Rheinland (sud du Fossé rhénan). Extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1981, figure 3. Les lignes soutenues marquent le front des domaines chevauchants ; l'écartement des doubles lignes situe l'ampleur du chevauchement. Les zones de cisaillements dextres indiquent également l'importance de cette progression. Le modèle cinématique à la base de ces déplacements correspond à une rotation de la couverture pivotant de façon horaire avec un ancrage situé à l'extrémité est du Jura. Cette présentation simplifiée place l'avancée du charriage frontal du Jura en fonction de stades successifs bien séparés. Cette vision s'écarte des données de la distribution des tremblements de terre observée dans les zones de charriage des grands chevauchements. L'auteur reconnaît qu'il aurait été plus réaliste de pouvoir quantifier l'importance de l'activité sismique de chaque front durant des périodes de l'ordre de cent mille années, mais de telles approches sont encore fort éloignées des possibilités de la recherche actuelle.

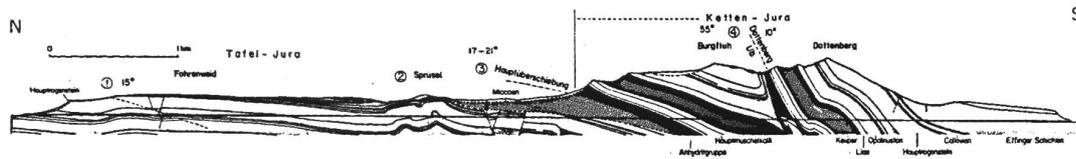


Fig. 85: Reprise du profil nord-sud du Jura établi par A. BUXTORF en 1916 lors du percement du tunnel du Hauenstein. Extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1983 figure 1. À gauche du centre du profil, chiffre 2, structure de Sprüssel.

lement présents dans les assises chevauchantes du Muschelkalk. Contrairement aux attentes, le mur de ce grand charriage-accident ne présente pas les importantes traces de glissement auxquelles on pouvait s'attendre bien qu'il soit marqué par des lambeaux de diverses assises étirées de grandeur décimétrique.

Au sud du chevauchement principal, la région élevée Bergfluh-Dottenberg, représentant le Jura plissé, est également marquée par un important chevauchement (point 4) très redressé; il ne montre aucune trace du glissement d'un flanc sud comme le voudrait la théorie d'Albert Heim voulant associer les charriages à la rupture de flancs inverses. Au contraire de cette proposition, la cinématique de ce charriage est présentée par quatre stades de son évolution (fig. 86).

En A), dans la série sédimentaire horizontale de la couverture du Jura, H. P. Laubscher distingue, au-dessus du socle cristallin couvert par les grès triasiques, le groupe de l'anhydrite (en noir); ce dernier est surmonté par le Keuper en gris sombre, lui-même surmonté par les calcaires du Lias peu épais auxquels succèdent les niveaux plus épais des Argiles à *Opalinus* puis de l'*Hauptrogenstein* (Dogger). Le charriage aveugle qui prend naissance au niveau des rangées évaporitiques du Muschelkalk se termine dans les couches des Argiles à *Opalinus* où il conduit à la formation d'un petit anticlinal en kink-bands. De cette structure, il poursuit sa route en suivant la zone de faiblesse représentée par les plans de kink-bands dont la pente est proche de 60°. Le plan de charriage se relève et conduit au développement de structures cataclastiques par rotation, étirement et écaillage des couches qui perdent ainsi de l'épaisseur, comme on a pu le constater au moment du percement du tunnel.

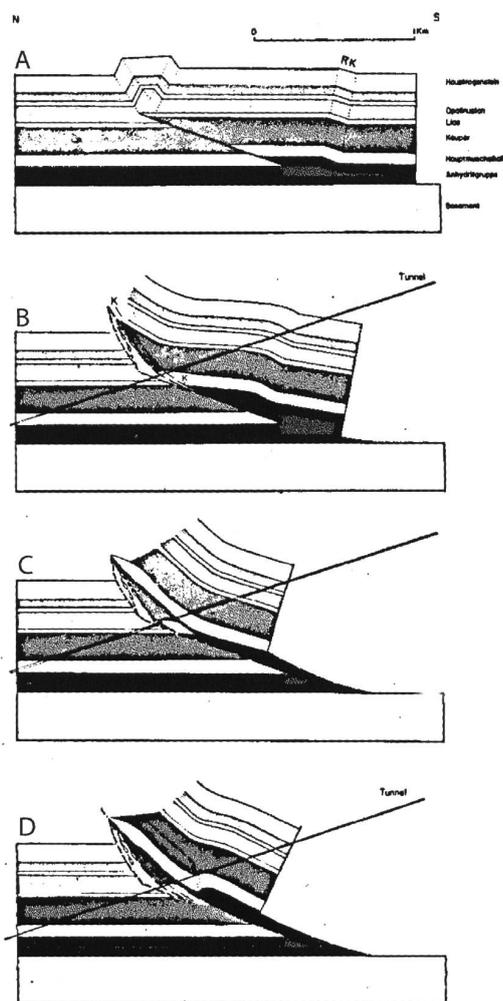


Fig. 86: Cinématique du charriage au sud du chevauchement principal de la région élevée Bergfluh-Dottenberg présentée par quatre stades de son évolution. Extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1983 figure 2.

7. 3. Conclusion

L'école bâloise s'impose par sa vision moderne et ses concepts sur la structure et le développement tectonique du Jura. L'interprétation d'un décollement des séries mésozoïques, au-dessus d'un socle peu ou pas déformé, et la théorie de A. Buxtorf du « *Fernschub* » en lien avec les Massifs cristallins externes s'imposent. H. P. Laubscher avait comme maître à penser A. Buxtorf, qui lui a inspiré une vision moderne de la géologie jurassienne; H. P. Laubscher apporte ainsi un modèle du plissement du Jura qui est toujours accepté aujourd'hui des deux côtés de la frontière. Il met au point une structure géologique du massif jurassien qui s'inspire beaucoup de celles observées en sismique. Il avait eu tout le loisir de pratiquer et de maîtriser cette technique, nouvelle pour le Jura, lorsqu'il travaillait pour la compagnie pétrolière Shell. Pourtant, à Besançon, l'école française était marquée du sceau de la théorie de Louis Glangeaud qui admettait un rôle important du socle sur la couverture jurassienne. Les successeurs de Glangeaud (qui le suivirent à Paris pour la plupart) travaillèrent sur le bassin méditerranéen (André Caire (1923-1979) dans le nord Algérien et Pierre Chauve (né en 1930)³ dans la cordillère bétique en Espagne). Certes, Maurice Dreyfuss (1906-1975) de 1956 à 1974 publia quelques notules de tectonique à l'occasion des levers de cartes et Antoine Bonte (1908-1995), à Besançon jusqu'en 1955, a suivi les forages du Jura occidental (chevauchement sur la Bresse) avec le BRGM⁴. À son retour à Besançon en 1969, P. Chauve s'est

reconverti vers l'hydrogéologie sans aborder vraiment la tectonique jurassienne.

Face aux arguments de H. P. Laubscher, les géologues français finissent progressivement par admettre le modèle du Bâlois. En effet, c'est lui qui démontre définitivement que le socle n'a aucune influence sur la couverture jurassienne.

Comme l'indique Vincent Bichet (communication personnelle):

« Laubscher est effectivement incontournable. Il a évolué au fil de sa carrière entre un modèle de déformation gravitaire puis compressif mais dans les deux cas qui n'impliquent pas le socle. C'est le modèle compressif de décollement de la couverture sur le socle qui prévaut aujourd'hui des deux côtés de la frontière, sans parler seulement de Besançon mais aussi des Grenoblois par exemple. Personne n'implique plus le socle pour la déformation du Jura interne. Le socle et ses accidents profonds ne sont mobilisés que pour expliquer les déformations sur la bordure externe du Jura, au niveau du faisceau bisontin et des Avant-Monts où l'émergence de la grosse zone transgressive qui affecte le socle entre les fossés rhéman et Bressan se fait sentir jusqu'en surface, en particulier par la faille dite de l'Ognon. Je pense qu'aucun Bisontin n'a jamais vraiment animé le débat en tectonique sur le Jura. »

Humainement, H. P. Laubscher était conscient de sa valeur et pouvait donner l'impression qu'il était un maître, laissant croire à ceux qui ne comprenaient pas qu'ils n'avaient pas le niveau...

³ Une note biographique consacrée à P. Chauve est due à Jean Gaudant (s.d.).

⁴ Bureau de recherches géologiques et minières. Service géologique national français, le BRGM est l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

Chapitre 8

Les éléments structuraux

8. 1. *Fernschub* ou charriage

L'idée d'utiliser la poussée des Alpes pour assurer le plissement des assises sédimentaires du Jura est ancienne, mais, pendant longtemps, elle reste vague et incertaine quant aux dispositifs qui pourraient conduire à ce phénomène. August Buxtorf présente l'idée d'une couverture détachée de son socle et plissée (voir Tectonique, chapitres 6.5. et 7). Cette proposition a été parfois critiquée, principalement par les théories qui envisagent un plissement des séries sédimentaires du Jura résultant de la déformation du socle sur lequel elles reposent (AUBERT, 1949, 1959 ; PAVONI, 1961 ; WEGMANN, 1961, 1962, 1960-1963). À l'opposé de cette voie, Jean Goguel, puis Hans-Peter Laubscher, furent les premiers à apporter des considérations théoriques permettant d'envisager que le déplacement de la couverture avec un cisaillement au niveau des évaporites triasiques représente une solution compatible tant avec les données de la mécanique des roches qu'avec les données de terrain (GOGUEL, 1943 ; LAUBSCHER, 1961).

8. 1. 1. Le rôle de Jean Goguel (1908-1987)

Pour J. Goguel :

« Les caractères propres de la tectonique de couverture apparaissent d'une façon particulièrement nette lorsqu'on peut faire abstraction, pour son étude, de la nature exacte des déformations du socle. Ces cas particuliers se trouvent approximativement réalisés dans les régions classiques, parmi lesquelles nous citerons immédiatement le Jura et les chaînes subalpines méridionales. Il suffit de savoir que les dimensions horizontales du socle ont varié, ou que la couverture a glissé dans son ensemble. Il faut évidemment, pour que cette approximation soit valable, qu'un certain ensemble de terrains sédimentaires jouisse d'une autonomie marquée par

rapport au socle sur lequel il repose, grâce à la présence à sa base d'une assise de très faible résistance mécanique. Cette assise, que l'on peut comparer à un lubrifiant, est fréquemment constituée par un terrain salifère, ou au moins gypsifère. On a vu (p. 188) la très faible valeur du seuil de plasticité du sel. Mais nous avons affaire ici, non plus à du sel massif, mais à des argiles salifères. Il est possible que certains glissements se produisent dans des lentilles de sel, mais les argiles elles-mêmes sont très plastiques, d'autant que les argiles sodiques ont tendance à se défloculer en présence de solution concentrée de sel. » (GOGUEL, 1943, p. 367).

L'auteur considère d'abord que lorsqu'une série glisse dans son ensemble sur un socle horizontal et y forme des plis successifs, la résistance au glissement augmente par les frictions qui se manifestent dans les intervalles entre les plis. L'allure et la hauteur de ceux-ci augmentent sous l'effet d'une compression qui, au cours du temps, devient de plus en plus importante pour vaincre la résistance qui augmente. Pour l'auteur, cette situation explique l'allure des plis présents dans le Jura au sud de Gex, où l'anticlinal le plus important est situé immédiatement au-delà de la zone molassique ; dans cette direction, les plis suivants perdent de plus en plus d'ampleur et d'altitude. Au-delà de ces considérations avant tout intuitives, J. Goguel cherche à préciser les résultats de l'approche du plissement du Jura par la mécanique des roches. Il soutient sa proposition par des considérations de terrains provenant de trois profils au travers de l'ensemble de la chaîne. À ces données de base, il relève que le Bassin molassique voisin doit être considéré comme faisant partie de la masse déplacée. Il juge que la poussée qui s'est exercée sur cet ensemble sédimentaire doit être recherchée dans les plis de fond en forme de coin des Massifs cristallins alpins situés à l'avant des zones alpines externes. En admettant un seuil de plasticité probable de 60 kg/cm² pour les assises salifères du Trias, alors

que des valeurs plus faibles pourraient être présentes en profondeur, il montre que les valeurs du travail produit par la couverture glissée s'étendant des Alpes au Jura externe sont compatibles avec cette approche théorique. On reste étonné que les propositions émises par l'éminent géologue français que fut J. Goguel, professeur à l'École des Mines de Paris, directeur du Service géologique de la France, aient été, durant des décennies, ignorées par bon nombre de ses compatriotes géologues travaillant dans le Jura. Cette situation s'explique partiellement par le fait que cette théorie, basée sur une approche mathématique et physique rigoureuse était, à cette époque, fort éloignée de celle qu'on pratiquait alors en géologie dans le Jura. En effet son approche par la mécanique des roches, et la friction, ne sera remise au goût du jour que dans les années 1980 avec l'avènement des modèles de prismes critiques pour expliquer le fonctionnement et les déplacements des chaînes de montagnes d'avant-pays (D. M. DAVIS & T. ENGELDER, 1985; DAVIS *et al.*, 1983).

8. 1. 2. L'apport de Hans Peter Laubscher (1924-2015)

Lorsque H. P. Laubscher reprend ce problème en 1961, il aborde tout d'abord la géométrie de la surface du socle placé sous le Jura. À cet effet, il utilise les données des forages encore peu nombreux et y ajoute, en accord avec les propositions de A. Buxtorf, les altitudes de la base de la couverture au niveau des synclinaux et des plateaux du Jura. Il montre alors que la surface du socle sous le Jura est, au-delà de la rampe marquant le passage Bassin molassique-Jura, une surface plane, particulièrement bien marquée entre Genève et Bienne. Au-delà des premiers chaînons de la zone interne, elle paraît peu accidentée; vers la Bresse et le Fossé rhénan, elle est limitée par des failles normales abaissant les compartiments nord au niveau du graben du Rhin et ceux d'orientation nord-est face à la Bresse. Au niveau des plus grands décrochements, les légères différences d'altitudes ne semblent pas représenter un trop grand obstacle à un glissement orienté NNW perpendiculaire à la corde de l'arc jurassien; encore moins lorsqu'on envisage le déplacement de la couverture par rapport à son socle associé à une rotation suivant des

arcs de cercles centrés sur l'extrémité de la chaîne (LAUBSCHER, 1972).

Cette structure permet d'abord de montrer que les idées associant les plis du Jura à des déformations du socle paraissent totalement vaines. Au-delà de cette constatation, H. P. Laubscher complète son analyse par des commentaires sur les résultats des forages entrepris pour l'exploration pétrolière au niveau de la bordure de la Bresse où des couches de charbon ont été reconnues dans le socle, sous le charriage. Là, dans la région de Lons-le-Saunier où les failles oligocènes et miocènes de la Bresse abaissent le socle de quelque 2,5 km, on observe que la couverture du Jura s'est avancée de 5 km au moins par-dessus ces failles bordières. Cette observation montre incontestablement qu'on est en présence d'un important charriage qui doit s'étendre en direction du sud-ouest sous les Plateaux de Lons-le-Saunier, de Champagnole et de Nozeroy. Ces plateaux ne sont marqués que par deux modestes accidents du socle qui ne sauraient être la cause de l'important déplacement de la couverture qui dans cette zone s'est avancée de 30 km au moins.

H. P. Laubscher montre que l'analyse mécanique et dynamique du plissement du Jura ne pose aucune difficulté pour valider l'hypothèse d'une poussée externe (*Fernschubhypothese* de Buxtorf) et que cette proposition qui englobe le déplacement du Bassin molassique à la faveur des niveaux de sels, d'anhydrites et d'argiles salifères assure des possibilités de décollement très comparables à celles reconnues sous les Plateaux au sud-ouest de Lons-le-Saunier. Sous le Bassin molassique, les possibilités de glissement sont facilitées par l'augmentation de la température et de la pression liée à la surcharge, et par des surpressions de fluides liées à l'expulsion de l'eau associée à la transformation du gypse en anhydrite.

8. 1. 3. Les évaporites

Au moment où A. Buxtorf propose l'hypothèse du découplage de la couverture du Jura par rapport à son socle par des assises évaporitiques triasiques, peu d'informations sont disponibles précisant la puissance de ces roches, leurs propriétés en fonction, les pressions et la température, tant dans le Jura que sous le Bassin molassique. Pour cet

auteur, c'est principalement la grande ductilité des assises d'halite qui permet d'assurer ce vaste charriage. Au cours des ans, on constate que cette heureuse proposition n'apporte pas une réponse à tous les problèmes structuraux rencontrés du fait que le sel est assez souvent absent de la zone de décollement.

Au-delà des premières décennies du xx^e siècle, alors que la recherche sur la genèse et l'évolution des évaporites n'avait pu être abordée que dans les zones externes du Jura, le percement du tunnel routier du Belchen dans les années 1960 et les travaux associés aux recherches sur le stockage des déchets radioactifs apportent de nouvelles données sur ces problèmes. Ces avancées scientifiques se font grâce à l'implantation de nombreux forages dans le Jura tabulaire et dans le Bassin molassique (H. DRONKERT *et al.*, 1990), et grâce aussi aux recherches en laboratoire touchant le comportement mécanique des séries évaporites triasiques en relation avec le plissement du Jura.

8. 1. 3. 1. Les assises évaporitiques triasiques du Jura

Les roches évaporitiques triasiques du Jura sont rapportées au Muschelkalk et au Keuper. En dehors des grès de base (grès bigarrés), les assises du Trias possèdent dans la Haute-Chaîne du Jura une épaisseur supérieure à celle que ces mêmes séries présentent dans les domaines immédiatement voisins (Anna SOMMARUGA, 1997, fig. 2.5). Dans le nord-est de la Suisse, leur connaissance a été sensiblement améliorée par de nombreux forages qui les ont traversées, permettant ainsi d'en avoir une meilleure connaissance que celle qui avait été obtenue par l'analyse d'affleurements discontinus, fortement perturbés par la tectonique.

Le Muschelkalk

Dans le Jura du nord-est de la Suisse, le décollement est associé au *Groupe de l'Anhydrite* situé dans la partie médiane du Muschelkalk; Peter Jordan propose de diviser cette unité en fonction du comportement rhéologique des différentes unités présentes (JORDAN, 1994, fig. 8):

Dolomies anhydritiques (10 m)

Couches à dominance marneuse (20-30 m)

Couches à dominance sulfatée (10-25 m)

Couches salifères (NaCl) (0-100 m)

Couches sulfatées inférieures (5 m).

C'est dans la partie inférieure de ce regroupement que se situent les niveaux de sel (halite). Dans le Jura tabulaire à l'est de Bâle, où ils sont exploités et bien reconnus (HAUBER, 1991), ils peuvent atteindre, peut-être par migration, une puissance supérieure à 100 m; plus au nord-est ils ont encore une épaisseur de 70 m; en direction de l'est leur puissance diminue assez régulièrement et finit par disparaître au nord de Zurich, là où le Jura plissé disparaît lui-même. Dans les régions du Jura plissé, la tectonique et de possibles érosions précoces rendent les estimations d'épaisseur de ces niveaux assez incertaines même si celles reconnues de part et d'autre de la chaîne laissent envisager que ces lithologies se poursuivent en direction du sud-ouest du Jura avec des épaisseurs de plusieurs dizaines de mètres.

Le Keuper

En Suisse, le faciès du Keuper a surtout été étudié dans le Jura oriental à la faveur de plusieurs forages et de deux carrières où le gypse y est exploité; dans le Jura plissé, ces niveaux, qui ont sédimenté sous forme de gypse, sont actuellement présents sous forme d'anhydrites accompagnées de minces niveaux d'argilites et de dolomies. Leur puissance augmente en direction du sud-ouest, où apparaissent des niveaux de sel dont la puissance atteint déjà 100 m au niveau d'Yverdon, et plus de 200 m, 20 km plus à l'ouest (JORDAN, 1994). Dans le Jura et les régions avoisinantes, les couches évaporitiques du Trias (Muschelkalk et Keuper), se distinguent par un manque de repères stratigraphiques ou lithologiques précis, permettant d'y établir des corrélations fiables; cette situation est en partie liée à l'environnement sédimentaire où ces roches se sont formées, mais résultent surtout de perturbations liées à la tectonique ainsi que par les modifications de structure et de minéralogie (anhydrite-gypse) qui ont accompagné la structuration de ces assises. Face à la déformation, les différentes lithologies triasiques ont des comportements allant des pôles de grande ductilité (niveaux de sel halite) à des niveaux très rigides

Stratigraphic column of the Triassic beds in eastern Jura.
(from Jordan, 1994).

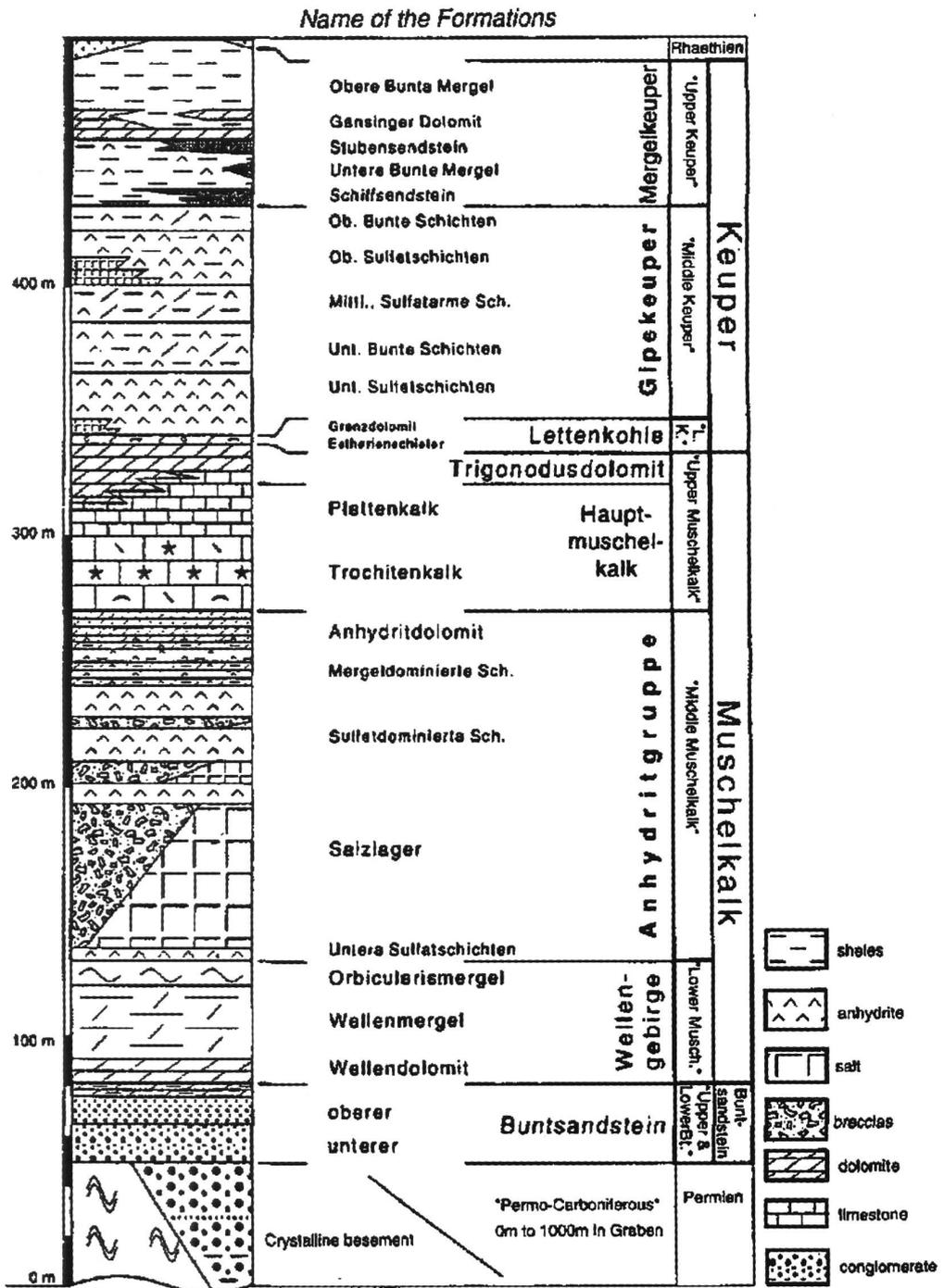


Fig. 87 : Image synthétique de la suite des lithologies présentes dans le Trias du Jura oriental. Extrait de SOMMARUGA 1997 et modifié de JORDAN 1994.

(grès siliceux) entre lesquels se situent les sulfates (gypses puis anhydrites), les associations argileuses et dolomitiques, les calcaires et les niveaux dolomitiques. Dans le faciès Muschelkalk, ces dernières assises se présentent souvent comme des suites d'écaillés qui, jusqu'à ce jour, n'ont pas fait l'objet d'études structurales détaillées.

8. 1. 3. 2. La déformation des niveaux évaporitiques du Jura

Les niveaux d'halite des séries évaporitiques du Muschelkalk, très déformés, assez rarement préservés dans les forages, n'ont été que peu étudiés sur le plan des mécanismes de la déformation (JORDAN, 1992). Pourtant, cet auteur y signale des niveaux mylonitiques avec des cristaux relativement grossiers (env. 2 mm) présentant un allongement dix fois supérieur dans la direction du charriage. Cet allongement serait probablement le résultat de déformation par pression-solution ou de mécanismes intracrystallins du type « *cross-slip* »¹ associés à l'action de fluides (JORDAN, 1992, p. 681).

L'absence ou tout au moins la rareté de couches de chlorure de sodium au niveau des zones de charriage potentielles conduit l'auteur à porter son attention sur la déformation des niveaux d'anhydrites. Les températures relativement élevées, mais toujours en dessous de 100°C, sont en parfait accord avec les traces de déformations enregistrées et préservées dans ces niveaux de sulfates (JORDAN, 1994), où elles s'observent à toutes les échelles, tant dans les couches du Muschelkalk que celles du Keuper, et on constate des déformations hétérogènes à la base et au sommet des niveaux d'anhydrites à partir d'une certaine épaisseur d'environ 50 m. Ces zones majeures de discontinuité contiennent des niveaux bréchiques et montrent sur quelques mètres le passage continu entre des zones à indices sédimentaires et des zones totalement mylonitisées (JORDAN, 1994, JORDAN & R. NÜESCH, 1989a, 1989b; JORDAN, T. NOACK & WIDMER, 1990).

¹ Il s'agit du résultat d'une contrainte sur des éléments à l'échelle cristallographique, qui subiraient un changement de direction dans l'espace.

P. Jordan présente (fig. 87) une image synthétique de la suite des lithologies présentes dans le Keuper du Jura oriental; il les regroupe à nouveau en fonction de leur caractère rhéologique afin de mieux faire apparaître les zones potentielles de chevauchement et de souligner les séries anhydritiques et marneuses; cette figuration illustre l'absence de niveaux d'halite dans ce secteur oriental de la chaîne, alors qu'ils assurent ce rôle dans le sud-ouest.

Au-delà des études portant sur la déformation enregistrée sur les carottes de forages (JORDAN, 1994, fig. 60b), l'auteur présente la déformation provenant de zones où affleurent ces roches, permettant de situer son ampleur dans le cadre régional (JORDAN, 1994, fig. 53 et 59a).

Au nord-est de Fribourg et du lac de Biemme, la zone de décollement est placée dans le groupe de l'anhydrite du Muschelkalk alors qu'en direction du sud-est cette surface se situe dans les gypses du Keuper. Les deux séries évaporitiques, du Muschelkalk et du Keuper, sont très hétérogènes tant du point de vue pétrographique que du point de vue rhéologique; dans les régions nord-est la discordance structurale majeure se place au niveau des séries d'halite du groupe de l'anhydrite du Muschelkalk, alors qu'elle est située dans les régions occidentales et orientales au niveau du groupe des sulfates là où le NaCl est absent par non-déposition, par dissolution ou par expulsion tectonique. Des études récentes, combinant une compilation de la littérature avec des analyses des lignes sismiques des campagnes pétrolières et les nombreux forages, ont permis d'affiner les cartes de distribution des différents niveaux d'évaporites du Keuper et Muschelkalk et de préciser la zone de transition orientée nord-sud entre le niveau de décollement principal en la plaçant aussi dans le Bassin molassique (SOMMARUGA *et al.*, 2017).

8. 2. Structures transversales : décrochements et abaissements d'axe

Très tôt on découvre que la chaîne du Jura est découpée morphologiquement par une série de grands accidents à très fort angle avec les plis. Les principaux et les plus développés sont orientés

essentiellement nord-sud avec un mouvement décrochant horizontal sénestre. Ils sont conjugués avec d'autres accidents d'orientation NW-SE à W-E à mouvement décrochant dextre.

8. 2. 1. Les précurseurs

Ces plans de failles verticaux à rejets horizontaux, marqués souvent par des stries et des cannelures horizontales sont tout d'abord reconnus par Albert Heim (1919) dans la région du Säntis (domaine de l'helvétique). Dans le Jura, Auguste Jaccard est le premier à signaler ces structures et à en reporter la trace sur une carte géologique, sans que ses observations, limitées à la reconnaissance d'un trait morphologique, lui permettent d'en saisir la signification (JACCARD, 1869). Au Salève, depuis la coupure de la chaîne par la vallée du Fier jusqu'à celle de l'Arve, Etienne Joukowsky et Jules Favre présentent une cartographie soignée où pas moins de neuf traces de décrochements sont cartographiées, en soulignant le déplacement des compartiments nord-est, en direction du nord-ouest (JOUKOWSKY & FAVRE, 1913). Pour ces auteurs ces déformations, comme le pli-faille du Grand Salève, se sont produites à l'époque des grands plissements alpins de la fin de l'ère tertiaire. Ils émettent l'hypothèse qu'une disposition aussi régulière ne peut être que le résultat d'une seule cause, à savoir l'arrivée des nappes de recouvrement. Ces dernières provoquèrent un refoulement oblique sur les différentes parties de la chaîne du Salève, occasionnant des ruptures sous l'effet de pressions inégales.

Pour Louis Rollier, le décrochement de la combe de la Ferrière, qui s'étend de la région de Tête de Ran jusqu'au Doubs pourrait résulter de l'érosion d'un ruz, antérieur au plissement (ROLLIER, 1894b); il pense que les plis-failles ne jouent qu'un rôle effacé. Cet auteur a pourtant évoqué l'importance des surfaces polies et striées par ce type de dislocations, soulignant l'intérêt qu'il y aurait à faire une étude exhaustive de ce phénomène dans le Jura (ROLLIER, 1898). Il note que très souvent ces surfaces de rupture sont obliques à la direction des plis du Jura; d'autre part, elles sont marquées par des stries horizontales comme cela se constate aussi au Saut de Brot et dans les gorges de l'Areuse, où on observe sur plus d'une centaine de

mètres un magnifique plan de décrochement avec cannelures, stries et plaquage de roches broyées. En 1915, après un voyage en ballon au-dessus du Jura vaudois, A. Heim fait part de son émerveillement après avoir observé et suivi depuis une altitude respectable la grande coupure interrompant l'alignement des plis entre Vallorbe et Pontarlier. Son analyse morphologique et cartographique lui permet de saisir la signification de ce décrochement et de le présenter dans un schéma couvrant une large part du Jura; il définit ainsi dix zones de décrochements majeurs recoupant la chaîne depuis le Salève au sud-est, jusqu'à l'est du Bassin de Delémont (voir fig. 54, p. 158).

Les zones de décrochements principaux ou majeurs sont toujours obliques aux plis et forment en plan un éventail de 75° entre leur orientation de direction 320°-315° (NW-SE à WNW-ESE) dans la région au nord de l'Île Crémieu et une direction 35° (NNE-SSW) au niveau du décrochement de Gänsbrunnen (ou Saint-Joseph, canton de Soleure) dans la zone du Passwang. Ces accidents présentent une disposition régulière dans la chaîne, et sont situés à quelque 16 km les uns des autres; le plus important (Vallorbe-Pontarlier) est placé au centre de l'arc. Ceux situés au sud-ouest sont particulièrement bien marqués au niveau de l'arc interne mais leur trace se perd avant d'atteindre la zone externe de la chaîne au niveau de la Bresse; ceux situés dans l'est de la chaîne ont une extension modeste et ne se développent que peu au-delà de la bordure molassique. Les déplacements relatifs apparents le long des décrochements sont régulièrement marqués par l'avancée du compartiment est en direction du nord, avec des déplacements relatifs cumulés qui, dans la partie méridionale du décrochement de Pontarlier, atteignent près de 10 km. Pour A. Heim, la formation des décrochements assure un allongement de l'arc externe de la chaîne et accompagne les dernières phases de plissement. Les grands décrochements sont tous sénestres, mais ils sont localement associés à quelques décrochements dextres de plus petite ampleur, comme ceux présents dans la région de Saint-Cergue, ou d'autres, comme la faille de La Sarraz – Mormont, présents le long du décrochement de Pontarlier.

Au cours de ses travaux dans le Jura neuchâtelais, Hans Schardt a toujours été très attentif

aux décrochements. Comme A. Heim, il souligne qu'au-delà des structures majeures de ce type, de très nombreuses cassures transversales recoupent fréquemment les plis, en n'étant parfois présents que sur un seul flanc de ces structures. Sa première étude, consacrée spécifiquement à un décrochement, concerne celui de Fontaine-André qui recoupe obliquement le flanc sud de l'anticlinal de Chaumont à l'est de Neuchâtel et provoque de visibles déplacements des assises crétacées, alors qu'il se perd avant d'atteindre le faite de l'anticlinal dans les couches du Malm (SCHARDT, 1900). Dans son étude de l'anticlinal de Châtollion (à l'est de Saint-Blaise), H. Schardt montre que ce pli secondaire situé au pied de l'anticlinal de Chaumont est provoqué par une poussée orientée au nord-ouest qui provoque un charriage limité par un décrochement nord-est (SCHARDT, 1910c). L'étude ultérieure de cette petite structure par László Király (né en 1935) souligne « *le contraste qui existe entre la simplicité des déformations continues (plis à grands rayons de courbure) et la complication des déformations discontinues (transversales et "longitudinales") à composante horizontale prédominante.* » (KIRÁLY, 1966 p. 127). Le plus important des décrochements observés provoque un déplacement de près de 400 m. Ce découpage conduit à un allongement de l'anticlinal et lui donne une orientation apparente proche de la direction nord-sud des décrochements, comme H. Schardt l'avait déjà remarqué. Les profils dessinés par L. Király, établis sur des plans parallèles aux décrochements, montrent que la structure chevauchante présente des pendages bien moins marqués que ne le présentaient les figurations antérieures. Dans les notes consacrées au pli-faille de la Vue des Alpes et aux prolongements de ces accidents en direction de l'anticlinal « Vue des Alpes – Mont Racine », H. Schardt précise l'association fréquente existant entre chevauchements et décrochements, sans s'engager cependant dans des propositions visant à associer ces deux phénomènes (SCHARDT, 1902, 1903). L'analyse du décrochement de Pontarlier par D. Aubert fait suite aux travaux du Genevois Henri Lagotala (1889-1954) sur ce sujet et à des informations présentées par l'auteur lors

d'une conférence donnée à la Société neuchâteloise des sciences naturelles (AUBERT, 1959; LAGOTALA, 1920). Cet accident décrochant majeur traverse toute la Haute-Chaîne du Jura, depuis le Bassin molassique près de Vallorbe, jusqu'au-delà de Pontarlier. Comme les autres cassures majeures de ce type, ce décrochement est traditionnellement interprété comme une structure d'étirement longitudinal formée lors du plissement. Par son étude, D. Aubert est conduit à en proposer une vision fort différente. Il considère qu'il s'agit d'une ancienne faille oligocène semblable à celles affectant le paysage du Jura tabulaire situé entre l'Alsace et la Bresse au-delà de la zone externe du Jura. Lors du plissement du Jura, au début du Pliocène, alors que la couverture sédimentaire se plissait en anticlinaux globalement perpendiculaires au déplacement, cette ancienne faille aurait joué en décrochement en provoquant un mouvement de sa lèvre orientale de 3 km en direction du nord par rapport à sa lèvre occidentale. Elle aurait ainsi séparé deux faisceaux de plis différents. Les uns comme celui du Risoux et ses synclinaux adjacents seraient des structures anciennes, antérieures au Stampien, donc à la sédimentation molassique et au décrochement, alors que les autres plis à l'est du Jura seraient plus tardifs, ayant été formés au Pliocène.

Au niveau de la bordure molassique, le décrochement de Pontarlier se trouve associé à des accidents de même nature dont l'un passe près du sommet du Suchet et l'autre par la ville d'Orbe; d'autres dislocations anciennes affectent aussi la région voisine du Mormont et celle de Sainte-Croix. Cette structuration précoce se trouverait associée à des déformations particulièrement tourmentées qui atteignent leur maximum à la Dent de Vaulion où l'anticlinal se trouve transformé en une petite nappe par chevauchement.

Cette vision de la déformation du Jura en deux phases distinctes conduit D. Aubert à rejeter la proposition d'une structuration de la chaîne par le glissement, partiellement entravé de la couverture sur son socle; elle le conduit à renouveler ses propositions (AUBERT, 1949), considérant que le Jura s'est formé au cours de phases d'écaillage distinctes, conduisant au soulèvement différentiel de sa couverture.

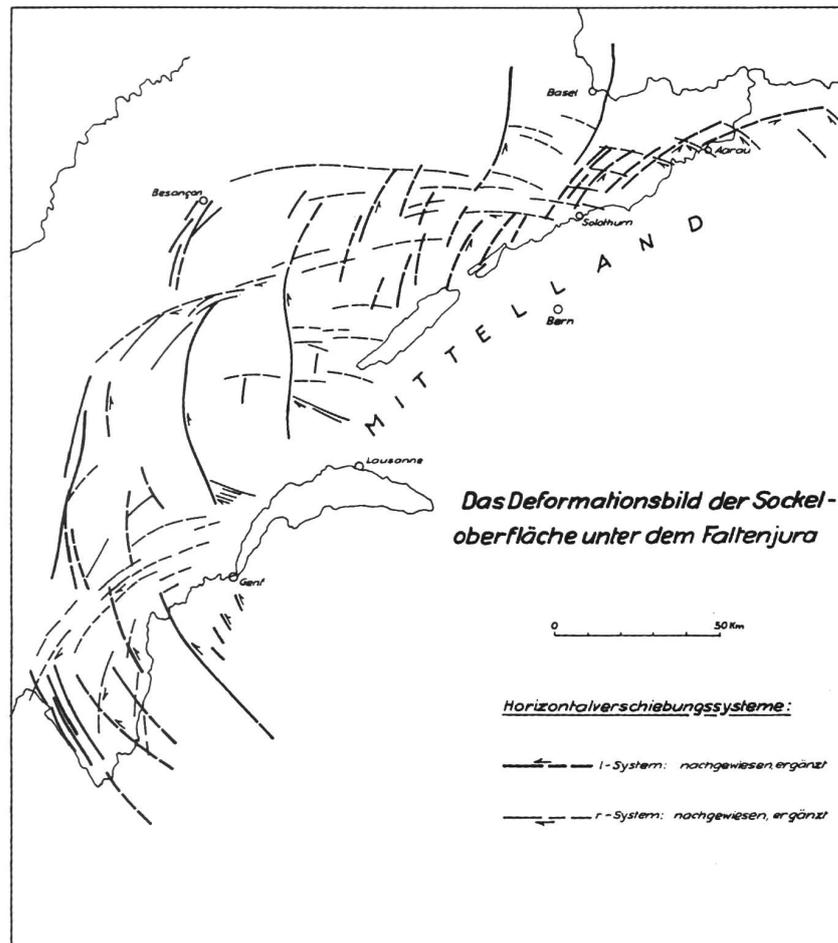


Fig. 88 : Décrochements visibles à la surface supérieure du socle et illustration des cisaillements, dextres et sénestres, présents dans les roches de couverture du Jura. Extrait de N. PAVONI en 1961. Analyse de la déformation du Jura plissé selon le principe des relations décrochements-plis, représentation schématique et simplifiée. Lignes continues : fractures et décrochements visibles en surface. Lignes en tireté : décrochements déduits de la déformation.

État de la déformation de la surface du socle sous le Jura plissé.

Systèmes de décrochements :

(traits en gras) Système sénestre : observé, supposé.

(traits en léger) Système dextre : observé, supposé.

8. 2. 2. Le rôle de Nazario Pavoni (1929-2014)

N. Pavoni fit ses études et toute sa carrière à Zürich ; plutôt solitaire, il fut scientifiquement assez isolé d'autant qu'il occupait une position charnière entre la géologie et la géophysique. Il paraît utile de présenter ici le détail de sa contribution de 1961 proposant que la déformation de la chaîne résulte

de déformations affectant son socle rigide et que celles-ci ont été transmises à la couverture décollée par les frottements induits au niveau des zones de décollement triasique (PAVONI, 1961). S'appuyant sur les relations observées en Californie entre les décrochements et les plis, il propose une image des décrochements visibles à la surface supérieure du socle (fig. 88). En fait, la figure de N. Pavoni est

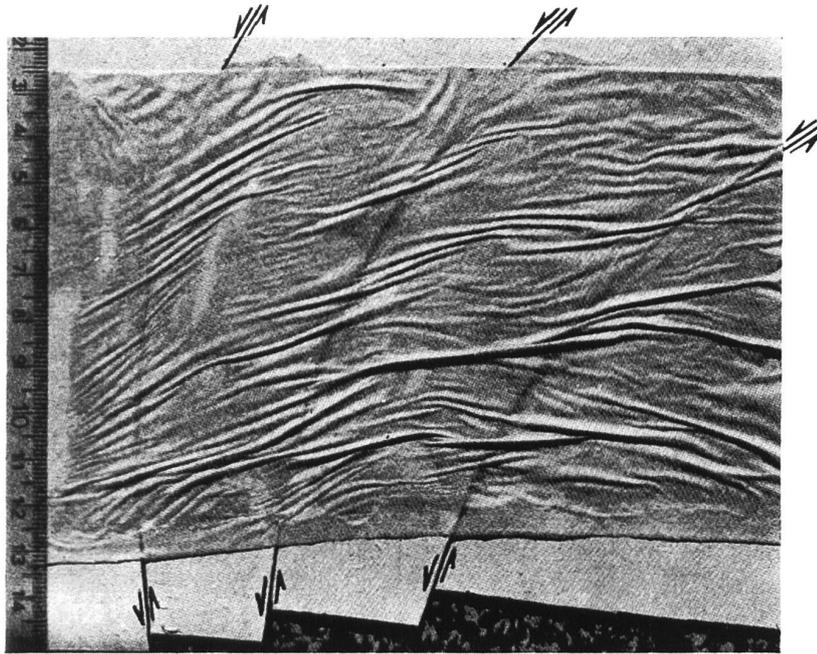


Fig. 89 : Modèle analogique du développement des plis à l'aide d'une feuille de papier humide placée sur un support de blocs rigides. Extrait de N. PAVONI en 1961.
Modèle du plissement par décrochement. Papier humide ultra-fin sur une couche de 0,5 mm de colle d'amidon. Échelle en cm.

une illustration des cisaillements dextres et sénestres présents dans les roches de couverture du Jura, où il est fait une distinction entre les déformations prouvées (*nachgewiesen*) et celles de caractère complémentaire (*ergänzt*). L'auteur admet, sans preuves, que les décrochements présents dans la couverture sont semblables à ceux du socle sous-jacent. On sait pourtant que celui-ci est très marqué par la tectonique hercynienne dont l'influence n'apparaît pas dans le découpage proposé. Pour illustrer et défendre ses propositions, N. Pavoni offre un modèle analogique où des plis se développent sur une feuille de papier humide placée sur un support de blocs rigides (le socle) qui, par glissements horizontaux, se déplacent les uns par rapport aux autres suivant des cisaillements de socle de direction reconnue dans la couverture (fig. 89). Les plis développés par cette manipulation, peuvent, dans une certaine mesure, par leur disposition relative, être considérés comme offrant une bonne analogie avec ceux observés dans le Jura. L'auteur propose

que dans le Jura, les deux systèmes de cisaillements résultent de la pénétration d'un piston rigide qui s'avance à l'horizontale dans le socle (fig. 90) en y provoquant des déformations de type plastique; celles-ci entraînent, dans la couverture, la formation par friction de plis relativement autochtones. Les propositions non conventionnelles de N. Pavoni, assez souvent soutenues par une frêle argumentation, ont été globalement rejetées ou ignorées; il est cependant probable qu'elles ont contribué à modifier d'une façon assez fondamentale l'approche de la formation des plis dans la couverture en soulignant le rôle important joué par les décrochements.

Certainement informé des propositions de N. Pavoni avant leur parution, Eugène Wegmann, Professeur de géologie à Neuchâtel depuis 1940, année où il succéda à Émile Argand, a souvent montré, lors de ses recherches sur le socle (Norvège, Finlande et Groenland), son intérêt pour les problèmes de relations entre les déformations profondes et celles de surface. Il cherche rapidement à donner son avis sur

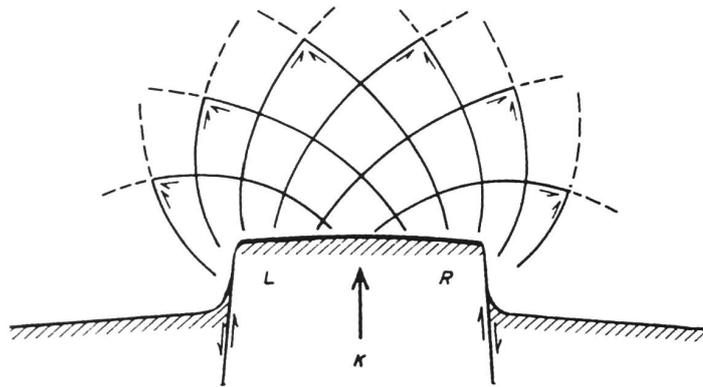


Fig. 90 : Modélisation des deux systèmes de cisaillement du Jura, provoqués par la pénétration d'un piston rigide qui s'avance à l'horizontale dans le socle. Extrait de N. PAVONI en 1961.

Portion du réseau semi-circulaire de cisaillements au voisinage de l'avancée du bloc K (« piston »), cas d'une déformation plane. Le réseau se compose d'un système en éventail de cisaillements respectivement dextres (éventail R) et sénestres (éventail L). L'image correspond à un schéma idéalisé, construit à partir de figures de déformation obtenues de manière purement empirique par des essais sur modèles de sable sec, de métaux déformables et de matériaux plastiques.

ce problème touchant le Jura où il travaille depuis plusieurs années. Il présente ainsi sa propre version des différentes géométries existantes dans une couverture stratifiée placée au-dessus d'un socle rigide soumis aux effets de fortes contraintes (WEGMANN, 1961, 1962). Pour lui aussi, dans de telles situations, on doit s'attendre à la formation de plis au niveau de la couverture et ceux-ci peuvent se présenter avec des géométries rappelant celles qui caractérisent les chaînes d'avant-pays comme celle du Jura. À ses yeux, la genèse des plis du Jura serait liée à de vastes zones de cisaillement relativement parallèles, agissant au niveau du socle, qui auraient, par friction, entraîné dans la couverture superposée, le développement de plis (fig. 91, WEGMANN, 1961).

Danilo Rigassi (1932?-2014) par ses publications sur les plis du Jura (1957, 1977) et sur le charriage du Risoux (1962) a soutenu les idées de E. Wegmann. Cet auteur défend « [...] l'hypothèse selon laquelle les plissements traduisent l'adaptation de la couverture – en partie plastique – à des grands décrochements affectant le socle antétriasique, ceci en opposition à l'hypothèse d'une poussée (« Fernschub ») liée à la tectonique alpine. » (RIGASSI, 2011). Cette théorie peine à expliquer la compensation dans le socle de plus de 20 km de raccourcissement dans la couverture.

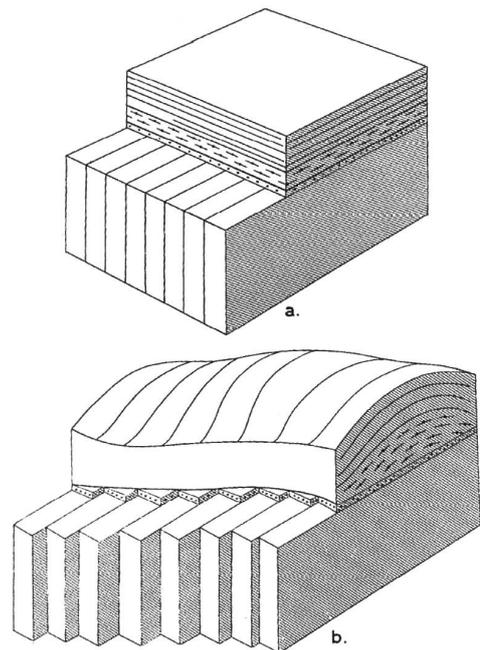


Fig. 91 : Représentation schématisque des plis produits par glissement de tranches du socle : a) couverture sédimentaire contenant un horizon de décollement reposant sur un socle, b) glissement inégal de tranches du socle produisant un anticlinal dans la couverture. Extrait de E. WEGMANN en 1961.

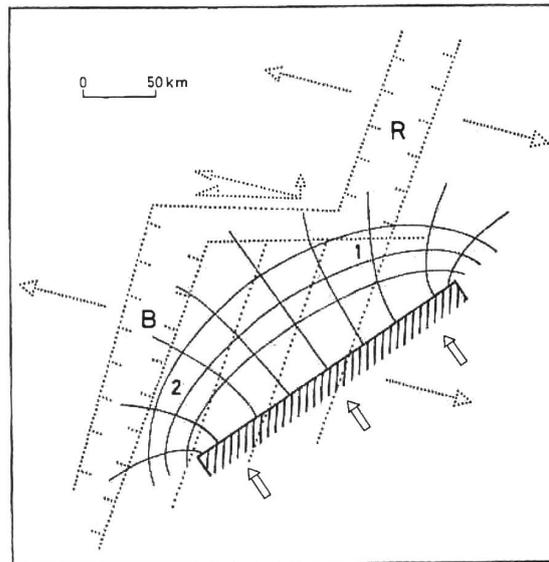


Fig. 92 : Schéma des déformations présentes à l'avant de la chaîne alpine. Extrait de H.-P. LAUBSCHER en 1972, figure 8. Relations schématisées entre le système de fossés Rhin-Bresse au Paléogène (lignes en pointillé) et le Jura au Néogène. Les trajectoires régionales σ , des fossés correspondent à la direction moyenne NNE des failles normales. La zone de décrochement complexe de la Trouée de Belfort est constituée principalement, mais pas uniquement, par des décrochements. Les trajectoires du Jura néogène recoupent les trajectoires paléogènes selon des angles variant largement.

8. 2. 3. L'importance de Hans Peter Laubscher

Dès le début des années 1960, H. P. Laubscher souligne l'importance des décrochements dans ses études consacrées au Jura (LAUBSCHER, 1961, 1965). Dix ans plus tard, il fait de ce phénomène l'un des éléments majeurs de son étude synthétique (LAUBSCHER, 1972). S'appuyant sur la direction des anticlinaux et de leurs cassures transversales, il présente, au niveau du Jura, une carte de l'orientation de la contrainte majeure ayant conduit à la formation de l'ensemble de la chaîne (fig. 75, page 193). Elle le conduit à proposer un schéma des déformations présentes à l'avant de la chaîne alpine (fig. 92) avec les zones d'extension formées par le graben du Rhin et la zone associée de la Bresse entre lesquelles la couverture du Jura se présente sous la forme d'une couverture chevauchante et plissée, déplacée sous l'effet de la poussée alpine; celle-ci provoque, dans

cette couverture partiellement rigide, des cassures orientées en fonction des directions de transport (chevauchements) qui sont associées à des cassures décrochantes, sénestres et dextres, situées de part et d'autre de la contrainte maximale, en accord avec les principes de la mécanique de la déformation des milieux solides. Durant des décennies, cette importante contribution où les structures, plis, charriages et décrochements sont examinés en fonction du régime des contraintes, dominant et évoluant dans le temps et dans l'espace, servira de base aux principales initiatives visant l'approfondissement des connaissances structurales du Jura.

8. 2. 4. Les décrochements selon Max Suter

Dans son analyse de la structure profonde du bassin de Delémont par l'interprétation de profils

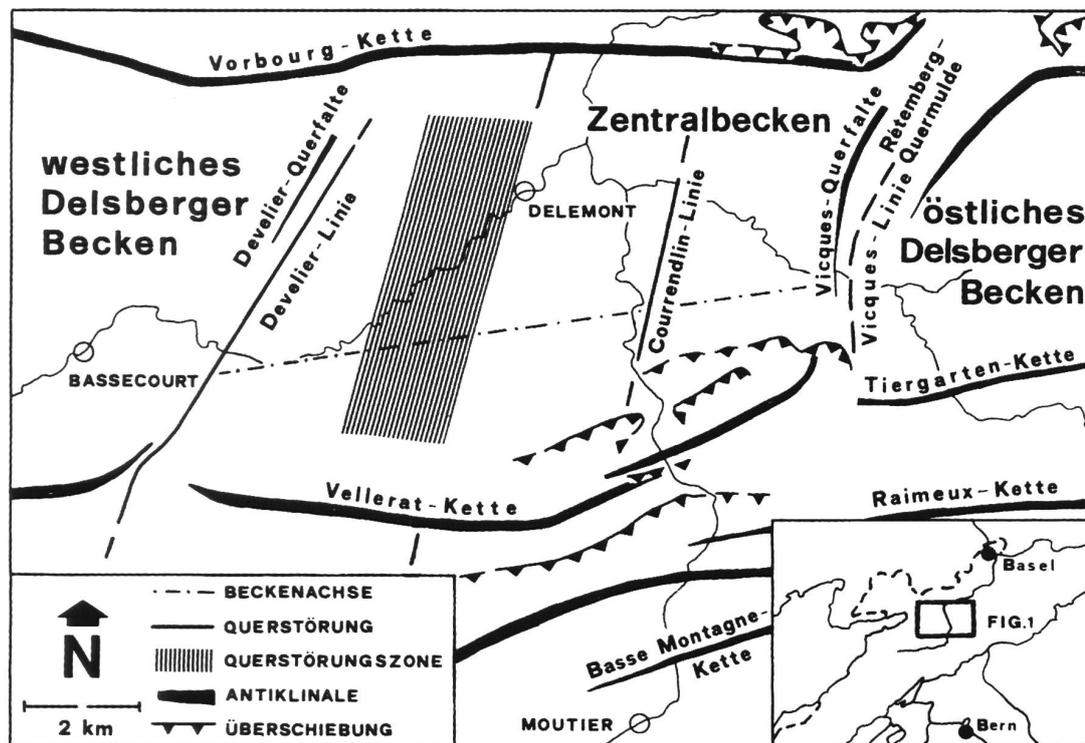


Fig. 93 : Structure du bassin central de Delémont avec ses failles normales qui agissent en décrochement lors du plissement du Jura avec des chevauchements associés. Extrait de M. SUTER en 1978, figure 1.

Esquisse tectonique, d'après la Feuille 1, Movelier-Soyhières-Delémont-Courrendlin (1930) de l'Atlas géologique de la Suisse 1:25 000, les cartes tectoniques par Elber (1920, tab. III) et Heckendorn (1974, tab. I) et l'interprétation du profil sismique 74BE10. La trace de l'axe du bassin central asymétrique peut être reconstruite d'après des observations de surface aux environs de Courfaivre (à l'est de Bassecourt) et, plus à l'est, (596.650/243.900) d'après le profil sismique nord-sud 74BE11.

Westliches Delsberger Becken: bassin de Delémont ouest;

Östliches Delsberger Becken: bassin de Delémont est;

Zentralbecken: bassin central;

Kette: chaîne;

Querfalte: plis transversal.

Beckenachse: axe du bassin;

Querstörung: décrochement;

Querstörungszone: zone de décrochement;

Antiklinale: anticlinal;

Überschiebung: chevauchement.

sismiques acquis en 1974, Max Suter confirme le prolongement vers le sud des linéaments structuraux de direction NNE de Develier et de Viques, qui divisent le bassin en trois compartiments (occidental, central et oriental) (fig. 93, SUTER, 1978). Formés au cours de la période Paléocène par des failles normales du système rhénan, ces accidents sont réactivés en décrochement au cours du charriage de la couverture du Jura durant le Néogène.

Durant le Paléogène, les sédiments associés au remplissage du Fossé rhénan parviennent jusque dans ce secteur du Jura plissé où des changements de faciès et d'épaisseur sont reconnus au niveau de ces linéaments d'orientation méridienne. Durant le plissement néogène, ces derniers provoquent des changements de la structure interne des plis ainsi que des modifications de leur orientation axiale associées à des charriages au sud et au nord.

Le second travail de M. SUTER en 1979 présente une analyse des structures situées au front du Jura plissé dans le secteur du Clos-du-Doubs à quelque 60 km à l'WSW de Bâle. Une attention toute particulière est donnée aux failles, plus spécifiquement celles de direction nord à NNE d'âge paléogène se rattachant au système de fractures méridiennes du Fossé rhénan. Elles présentent dans ce secteur des rejets de 150 à 180 m qui sont préservés au-delà des effets du plissement tertiaire. La totalité des nombreux décrochements reconnus dans ce secteur sont de type sénestre; ils ont été formés par réactivation des anciennes failles méridiennes et provoquent régulièrement des déplacements au niveau des plis régionaux orientés est-ouest. L'auteur pense que l'absence de décrochements complémentaires sénestres pourrait bien être le reflet de la structuration régionale que les failles méridiennes du Fossé rhénan avaient créé dans ce secteur avant le plissement. Elles ont facilité des glissements « en tiroirs » qui n'ont pas leur équivalent dans les directions de déplacements dextres.

8. 2. 5. Abaissements d'axe

En étudiant le chevauchement des Moulins au sud-est de Saint-Claude, Jacques Mudry (né en 1951) et Patrick Rosenthal (né en 1951) montrent que les structures s'abaissent symétriquement en direction de la vallée du Flumen (MUDRY & ROSENTHAL, 1977a et b). L'axe du compartiment chevauché (synclinal de Septmoncel-la Pesse) s'abaisse de 400 m au sud et de 350 m au nord, alors que le flanc ouest de l'anticlinal chevauchant de Lajoux-Bellecombe s'abaisse seulement de 250 m au sud et de 200 m au nord, et que le plan de chevauchement lui-même ne s'abaisse que de 250 m au sud et 150 m au nord. Cette observation montre que l'abaissement axial du Flumen a joué avant et pendant (et/ou après) le chevauchement. Le rôle hydrogéologique de cette structure majeure est décrit dans Hydrogéologie, chapitre 4.3.1.1.

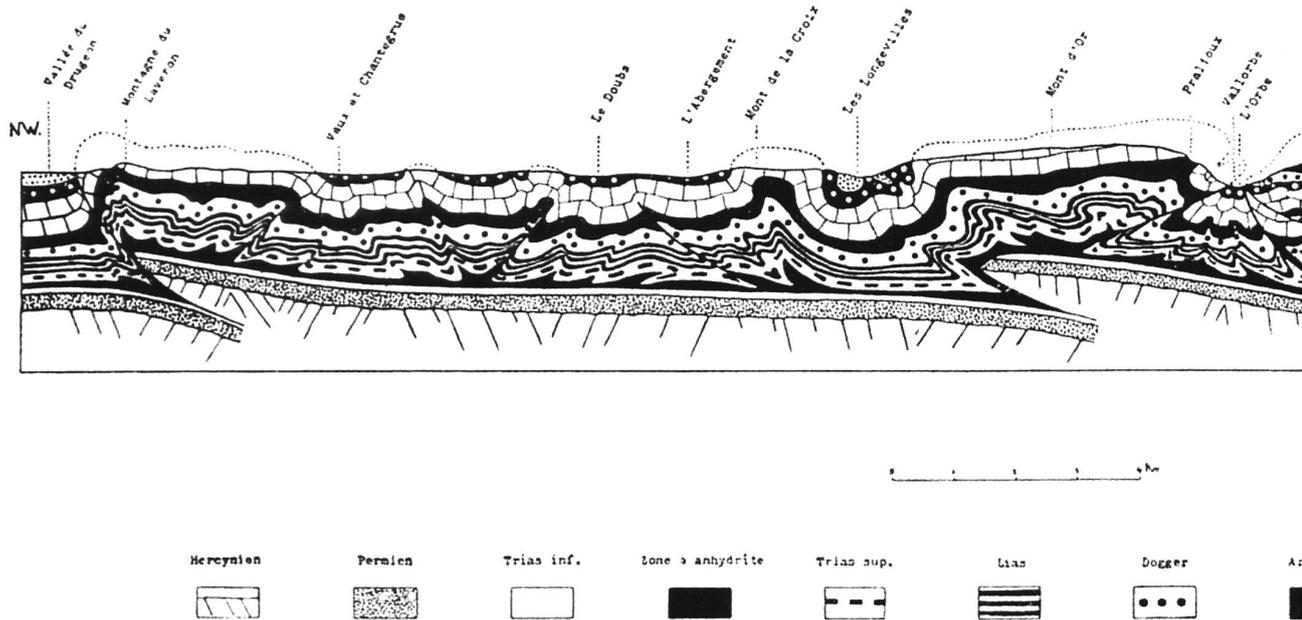
8. 3. Failles et fracturation

L'ubiquité et la diversité d'orientation et de taille de divers systèmes de fractures en font une, sinon

la structure tectonique la plus fréquente rencontrée dans le Jura.

8. 3. 1. Le comportement du socle

Dans le Jura, l'intérêt porté aux décrochements et aux failles de la couverture conduit plusieurs chercheurs à s'interroger sur les relations pouvant exister entre ces accidents de surface et ceux ayant affecté les roches du socle. Dans le Jura tabulaire, les études de A. Buxtorf et celles de ses successeurs ont montré que ces accidents oligocènes méridiens se poursuivent dans le socle et ne sont pas perturbés par le plissement de la fin du Miocène. H. Cloos avait montré que les traces de ces accidents pouvaient être identifiées dans la couverture charriée du Jura plissé, montrant leur antériorité par rapport au plissement et aux charriages. Dans le Jura interne occidental et méridional, où la couverture sédimentaire est plus importante, l'absence d'affleurements de socle ne peut conduire qu'à des spéculations sur l'influence possible des failles hercyniennes dans ce secteur. Pour aborder ce sujet, D. Aubert fait l'inventaire des perturbations qui ont marqué le développement sédimentaire de la future chaîne (AUBERT, 1949). Il note que celles-ci sont marquées par de nombreux changements de faciès dont certains paraissent être en relation avec des accidents topographiques de la surface sur laquelle ses sédiments se déposaient durant le Jurassique déjà, mais surtout au cours du Tertiaire; il constate que, dès l'Éocène et le Stampien (de nos jours le Rupélien), la sédimentation en milieu continental puis marin est accompagnée par des dislocations. De plus, dans la région située à la limite externe du Jura plissé, des sondages effectués près de la faille de l'Ognon montrent que des accidents de ce type se prolongent jusque dans le socle et paraissent être accompagnés par des plis précoces. Pour l'auteur, ces faits indiquent que des déformations tectoniques ont affecté le plancher sur lequel se déposaient les sédiments de la future chaîne. Il envisage que ceux-ci ont pu être amplifiés au cours du Tertiaire par des distensions et des cassures liées à l'orogénèse alpine. Cette situation l'engage à présenter de nouvelles solutions se rapportant à l'évolution de la chaîne



au niveau du Jura vaudois (fig. 94, AUBERT, 1949) en proposant que certaines structures anticlinales et synclinales de la Haute-Chaîne proches du Bassin molassique aient été portées en altitude à la faveur de l'écaillage du socle, conduisant à la formation de structures chevauchantes à cœur cristallin rappelant, bien que plus modestement, la structuration du front des massifs cristallins hercyniens du domaine de l'Helvétique.

Pourtant, les différentes propositions reliant les déformations cassantes de la couverture à celles du socle ont été assez rapidement abandonnées, en partie du fait qu'elles reposaient presque uniquement sur des propositions provenant d'observations récoltées dans la couverture sans qu'il soit possible de les suivre dans le socle qui n'est pas affleurant dans la chaîne. De plus, assez rapidement, des données provenant de la géophysique ont confirmé la nature charriée de la couverture au-dessus des évaporites triasiques, un milieu plastique peu favorable pour assurer la poursuite des accidents cassants du socle jusque dans les roches de la couverture.

8. 3. 2. La fracturation des assises calcaires

À première vue, l'observation des affleurements quelque peu étendus des assises du Jura, permet de reconnaître que les couches présentent une belle continuité. Par un examen plus attentif, on se rend compte que cette première impression n'est pas confirmée, surtout là où l'on dispose d'affleurements suffisamment frais pour y observer les moindres discontinuités et la présence de fréquentes cassures même dans les calcaires massifs; cette situation ne permet l'utilisation de ce matériau abondant et relativement facile à travailler que pour faire des bassins destinés à retenir l'eau. Pour éviter les pertes de liquide on a colmaté les fuites avec de l'asphalte ou trouvé des zones favorables où la roche avait été préservée, comme dans les environs de Soleure. Dans le Jura, la fracturation des assises calcaires a été examinée en fonction de critères variables souvent associés à des objectifs spécifiques que poursuivaient les différents chercheurs: morphologie, écoulements karstiques, relations structurales avec

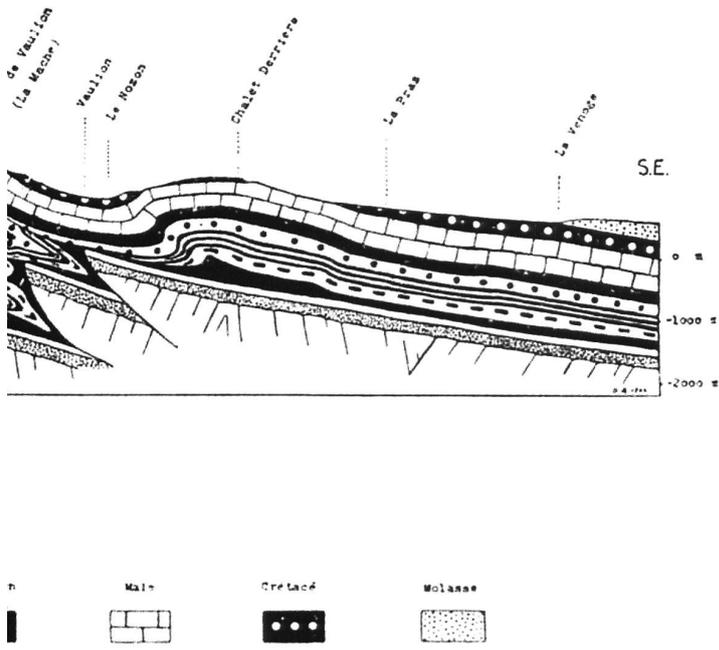


Fig. 94 : Coupe géologique de la zone interne du Jura passant par Vallorbe. Extrait de D. AUBERT en 1949, figure 3.

d'autres paramètres structuraux comme les décrochements, plis et plans de charriages. Les analyses comparatives qui furent pratiquées se sont attachées à étudier l'orientation, la fréquence, l'âge et les relations que ces éléments présentaient avec ces mêmes autres éléments structuraux, afin de déterminer les régimes de contrainte qui les avaient créés au cours d'une histoire pouvant être complexe. L'étude de la fracturation pose un problème en soi par le fait que les zones particulièrement affectées par ce phénomène, comme les grands décrochements et les plans de charriages majeurs, sont caractérisées par une absence d'affleurements de qualité; dans de telles situations, il est souvent nécessaire pour aborder les relations spatiales existant entre les différents éléments structuraux de s'en remettre aux conditions rencontrées dans des carrières voisines, où la fracturation peut être moins développée.

8. 3. 3. Failles et fractures

L'analyse des plis, leurs particularités géométriques et leurs relations avec les cassures présentes (diaclasses, failles) tant dans les secteurs

restés horizontaux que dans les domaines plissés, sont évoqués très tôt sans cependant que ces éléments structuraux fassent l'objet de recherches spécifiques en dehors des initiatives de Jules Thurmann (voir Tectonique, chapitre 2.1.) et de quelques autres. Dès qu'il est admis que le Jura résulte du refoulement d'une couverture de roches calcaires et marneuses sous l'effet de la poussée alpine, on s'interroge sur la façon dont ces roches, d'apparence rigide, peuvent former de larges voûtes d'allure souple, ne présentant souvent aucune trace de rupture. Les dernières propositions de J. Thurmann pour analyser le détail des déformations qui ont accompagné les plis, les charriages et les zones de ruptures transversalement à la chaîne, n'ont pas été suivies (THURMANN, 1853). Pourtant, nombreux ont été ceux qui s'interrogeaient sur la nature des mécanismes qui ont permis la formation de structures aux allures ductiles alors que des traces de cassures sont régulièrement présentes, montrant des traces de friction et de déplacement dans les zones plissées mais également dans les zones restées subhorizontales.

Ayant observé la complexité des cassures associées aux plis dans le Jura central, Alfred Glauser (1908-2000) pense trouver des conditions structurales suffisamment simples dans le pli de Lägern à l'extrémité orientale de la chaîne, pour lui permettre de comprendre la formation de ces éléments structuraux accompagnant le plissement (GLAUSER, 1959). Dans ce secteur, l'examen des plans de cassure, provenant des deux flancs de l'anticlinal, montre que malgré le plissement, ces éléments possèdent toujours une orientation perpendiculaire aux plans de couches. Leurs orientations mesurées, présentes sur les deux flancs de l'anticlinal, dans des situations où les couches sont peu inclinées, sont régulièrement associées à deux groupes de plans de cassures, placés de manière symétrique par rapport à la normale à l'axe du pli. Ces regroupements des plans de cassure indiquent très probablement que leur formation est associée aux cisaillements ayant accompagné le plissement. Les observations de terrain et les analyses de stéréogrammes conduisent l'auteur à conclure que ces deux systèmes de cassures se sont formés peu avant le plissement en étant associés aux effets des tensions qui se manifestaient à l'endroit où les plis allaient se former.

Dans les plans de couches très redressés du flanc nord de l'anticlinal, l'auteur observe un autre groupe de fissures et de diaclases; faiblement inclinés au sud-ouest, ces plans de rupture se trouvent en relation avec un plan de chevauchement dont ils paraissent également assurer, à petite échelle, la même action chevauchante que l'accident principal, tout en étant légèrement plus tardifs.

Dans les différentes recherches sur l'orientation des cassures présentes dans la chaîne, J. THURMANN (1853, 1857) avait indiqué qu'au-delà du Jura, les plans de stratification étaient marqués par des traces de frictions et par des stylolites. Après l'échec de ses propositions sur l'analyse des différentes traces de déformation reconnues dans les assises du Jura destinées à suivre l'évolution structurale de la chaîne, on tenta d'utiliser l'orientation de différentes structures présentes dans les strates calcaires pour suivre la formation des plis, des failles et des décrochements. Dans cette approche, pour un temps, ce sont les stylolites qui prennent une position privilégiée. Ces structures, dont l'origine

est associée à de la dissolution sous pression, permettent d'associer la direction de leurs pics à la direction de la contrainte compressive ayant affecté les strates calcaires.

A. Buxtorf montre pour sa part que dans le Jura tabulaire situé au nord du Jura plissé, les grabens sont limités par des failles méridiennes oligocènes antérieures au plissement. Sur la base d'une reprise précise de la cartographie géologique du Jura neuchâtelois, Alec Baer (1931-2019) examine le rôle joué par les décrochements dans cette partie du Jura plissé où se situe le dernier grand décrochement dextre de la chaîne en direction est, celui de la Ferrière (BAER, 1959). Au niveau de la chaîne Mont Racine – Tête de Ran – Mont d'Amin bordant le synclinal du Val de Ruz sur son flanc nord-ouest et nord, trois plans verticaux décrochants majeurs recoupent cette structure anticlinale avec des stries horizontales et des zones mylonitiques de plus de 10 cm d'épaisseur. Le caractère dextre de ces structures est attesté par les plans striés et par les déplacements de niveaux stratigraphiques redressés. Les nombreux décrochements de seconde importance et même d'ordre inférieur conduisent à des déplacements « en escalier » des compartiments qu'ils délimitent; à l'échelle régionale, dans la chaîne Tête de Ran – Vue des Alpes – Mont d'Amin, ils conduisent à assurer une courbure assez régulière. Cette chaîne n'est pas liée à un cintrage des assises calcaires rigides mais résulte de leur fracturation qui s'exprime par les cassures décrochantes majoritairement sénestres mais également dextres, ainsi que par des cassures perpendiculaires aux directions axiales des plis.

« Il n'y a nulle part de courbure dans les niveaux compétents, mais toujours des cassures. Le comportement du pli est essentiellement rigide » (BAER, 1959, p. 879).

L'auteur s'interroge sur la raison de l'obliquité des décrochements secondaires par rapport aux dislocations principales tout en étant parallèles entre eux; il envisage que les dislocations secondaires soient contemporaines des derniers mouvements le long des grands plans des décrochements et ne représentent qu'un effet secondaire de ceux-ci.

8. 3. 4. Apport de la microtectonique dans le Jura

Le travail *Untersuchungen über Faltung und Klüftung im nordschweizerischen Jura*, de Walther Karl Nabholz (1918-1997) représente avant tout une contribution de caractère didactique où l'auteur montre l'importance de l'analyse microtectonique pour approfondir l'évolution des structures des chaînes de montagnes (NABHOLZ, 1956). Ce type de recherche qui s'attache à l'analyse de la géométrie et à l'orientation des strates, des diaclases et autres plans de discontinuité paraît pourtant tout désigné pour aborder les particularités des calcaires tectonisés de la chaîne du Jura. Une première présentation de cette approche est pratiquée le long des gorges de la Birse, entre Moutier et le synclinal de Delémont et permet de reconnaître que les faisceaux de diaclases oligocènes présents dans le Jura tabulaire se poursuivent plus au sud, jusque dans le Jura plissé (Bassin de Delémont, cluse de Moutier et même jusque dans la région du Passwang). À cette ancienne génération de fractures et de diaclases se trouve associée une seconde génération de cassures intimement liées au plissement; cette dernière se reconnaît par la continuité que ces accidents présentent en traversant des suites de bancs superposés, sans être affectée par les nombreux glissements marqués par de multiples traces de frictions et de stries. À ce niveau, les traces de mouvements et les stries présentent souvent des orientations divergentes qui sont interprétées par l'auteur comme des marques de phases successives de déformation. Les assises massives du Dogger et du Malm qui participent au ploiement de ces couches gardent leur épaisseur et les oolites qu'elles contiennent ne sont marquées par aucune déformation interne attestée. Le plissement est pourtant confirmé par une légère rotation des diaclases longitudinales et surtout par un imperceptible basculement de fragments de couche massive qui paraissent être entourés par des diaclases conduisant à l'augmentation de leur pendage par rapport à celui de leur entourage; des diaclases parallèles ou légèrement inclinées par rapport à l'axe de plissement semblent s'être ouvertes pour assurer l'accentuation de la courbure; c'est certainement au niveau de la matrice qui entoure les oolites que s'opèrent les transformations qui permettent la déformation de ces niveaux massifs. L'auteur termine son propos en recommandant que, dans le Jura, des études microtectoniques abordent la déformation des assises argileuses

et marneuses qui, jusqu'à ce jour, ont été trop négligées, par le fait qu'elles n'offrent généralement que peu d'affleurements favorables à ce type d'études.

Dans l'*Étude tectonique de l'anticlinal de Chaumont* (SCHAER, 1956), l'auteur s'attache à l'examen des plans de couches et des fractures (failles et diaclases) présentes dans l'anticlinal relativement simple de Chaumont situé au nord et à l'est de Neuchâtel. Pour les cassures, les mesures de terrain sont regroupées régionalement, sous la forme de roses des vents dans le but de révéler l'orientation et la fréquence de ces accidents. Cette façon d'opérer conduit à des résultats statistiquement peu fiables du fait que les mesures de terrain sont influencées, de façon non négligeable, par l'orientation et l'accessibilité des affleurements. Elles ne donnent donc pas une représentation fiable de la fréquence et de la répartition des plans de fractures analysés. Elles font cependant souvent ressortir que les fissures verticales les plus fréquentes sont parallèles aux plans de décrochements dextres de ce secteur, et qu'elles sont elles-mêmes marquées par des stries horizontales qui indiquent que ces plans de cassures ont très souvent agi comme plans de glissement. Ainsi, dans les zones peu perturbées du Jura, les décrochements induisent dans leur proximité des cassures verticales parallèles à leur alignement portant de mêmes stries horizontales parallèles à celles qui caractérisent les décrochements majeurs; elles représentent les traces de réseaux de décrochements d'ordre inférieur affectant la trame rocheuse proche des accidents majeurs; comme eux, majoritairement verticaux, elles portent souvent des traces de glissement horizontales sénestres ou dextres qui forent des miniréseaux à l'intérieur du réseau cartographiable d'ordre supérieur.

Dans son étude de thèse de la région du Mont Aubert, Jean Meia utilise de manière systématique une approche d'analyse d'orientation et de cinématique de failles et fractures (MEIA, 1969). Dans son travail sur le Mont Aubert et l'anticlinal du Soliat, à l'ouest du Creux du Van, il évoque « *les déformations cassantes perturbant ces plis par le jeu de dislocations, (décrochements, failles), surtout transversales et obliques* ». Il documente la disposition en failles conjuguées sénestres et dextres.

D. Aubert, après H. Schardt, montre que dans la région du Mormont les fissures remplies de sédiment sidérolitique d'âge éocène possèdent des orientations méridiennes attestant une structuration cassante précoce qui a été, au moins localement, reprise par les grands plans du décrochement de Vallorbe. Par la suite, le même auteur décrit aux Verrières de Joux (D. AUBERT, 1972) un ancien karst fossile dans les calcaires de l'Hauterivien plissé, dont les nombreuses fissures sont comblées par un remplissage de roches de la Molasse marine burdigalienne. Ces fissures de dissolution « *ont une direction telle qu'après rabattement des bancs hauteriviens à l'horizontale, elles se trouvent dans une position à peu près parallèle à la trace du décrochement de Pontarlier situé à quelques kilomètres à l'W.* » (D. AUBERT, 1972, p. 88).

Il rappelle les karsts fossiles des sondages de la Bresse, attribués au Miocène par Georges Lienhardt (1929?-2019?) (LIENHARDT, 1962), ceux de l'Éocène de Génissiat (au sud-ouest de Bellegarde-sur-Valserine) par Maurice Gignoux (1881-1955) et J. Mathian (GIGNOUX & MATHIAN, 1952) et du Salève (MARTINI, 1962); ces karsts fossiles montrent que l'érosion karstique du Jura s'est développée en plusieurs endroits avant son plissement, sur des sites qui étaient déjà marqués par une fissuration importante qui s'étendait probablement largement sur les plateaux calcaires qui formaient le Jura avant la fin du Miocène.

Laszlo Király a acquis l'intérêt pour les problèmes structuraux jurassiens au contact d'E. Wegmann, Professeur à l'Institut de géologie de l'Université de Neuchâtel. Un exemple d'étude réalisée par L. Király, en collaboration avec J. Meia, est celle de la carrière de la Cernia, à l'extrémité sud-ouest de Chaumont (canton de Neuchâtel). Les auteurs y ont étudié de manière détaillée la fissuration des calcaires à l'échelle de l'affleurement (KIRÁLY & MEIA, 1967). Les mesures, traitées à l'aide de la projection stéréographique, permettent de mettre en évidence des déformations discontinues (décrochement et chevauchement) et continues (plis et « crochons »). L'analyse cinématique a permis de mettre en évidence que le mouvement des parties charriées possède une composante perpendiculaire à la direction du décrochement. Ces résultats

démontrent la complexité possible de certains secteurs qui présentent en surface une apparente tranquillité.

L. Király a mis au point une méthodologie d'étude statistique de la fissuration des calcaires et de son hétérogénéité spatiale par « échantillonnage emboîté » selon W. C. KRUMBEIN & F. A. GRAYBILL (1965). Ces travaux ont été étayés de manière interdisciplinaire, en tenant compte de ceux d'Adrian E. SCHEIDEGGER en 1960 et 1965, physicien, et de Léopold MÜLLER (1908-1988) en 1963, ingénieur civil et mécanicien des roches. L'analyse des mesures permet le calcul des fréquences réelles des fissures et de leurs intersections. Cette méthode a été appliquée à la région des Ponts-de-Martel, canton de Neuchâtel (KIRÁLY, 1969a). La variance des fréquences réelles a été calculée entre des affleurements éloignés les uns des autres de quelques mètres seulement, entre des groupes d'affleurements éloignés de quelques centaines de mètres et entre des ensembles de groupes éloignés de quelques kilomètres. Il apparaît que l'hétérogénéité des fréquences est surtout locale, avec une variance maximale entre les affleurements rapprochés. L'interprétation des résultats permet à l'auteur de tirer des conclusions sur la cinématique du plissement dans la région étudiée, en particulier sur l'importance des rotations internes le long de certains systèmes de discontinuités.

Le savoir-faire acquis par ces travaux a été appliqué par L. Király à l'étude des écoulements souterrains dans les calcaires fissurés. L'évaluation statistique de l'orientation et de la fréquence réelle des éléments structuraux a permis à l'auteur de calculer le tenseur de perméabilité et d'établir la relation entre la fissuration et les paramètres hydrauliques des écoulements (KIRÁLY, 1969b). Les travaux de L. Király dans le domaine de la fissuration des calcaires et des caractéristiques de l'écoulement sont commentés plus loin, dans la partie Hydrogéologie, chapitres 4.3.1.3. et 6.2.5.1.

À Besançon, la fracturation à l'échelle du Jura a été étudiée par Jean-Pierre SOPENA & Jean-Paul SOULAS en 1973. Ils ont mesuré 6 500 diaclases sur 28 affleurements. Ils montrent en plateau quatre jeux de diaclases en relation avec la direction de raccourcissement, par ordre d'importance : un jeu parallèle, un jeu perpendiculaire, et deux jeux symétriques à 25° de part et d'autre. Les familles en X sont peu nombreuses. En faisceau, les mêmes familles sont

basculées sur les couches inclinées, attestant leur préexistence au plissement. Cependant, la famille parallèle à l'axe du pli est très peu mesurée.

Dans le Jura central, à partir des diaclases, stylo-lites et stries, J. P. Sopena et J. P. Soulas trouvent deux directions de raccourcissement majeures : N000 très marquée dans les faisceaux bisontin et salinois et N125, surtout visible au sud de Lons-le-Saunier et dans la Haute-Chaîne. La direction N000 connue à l'Éocène dans le sud de la France, induit les effondrements bressan et rhénan à l'Oligocène, en réactivant probablement des fractures plus anciennes. Au Miocène, cette direction de raccourcissement façonne les faisceaux bisontin et salinois, produit le soulèvement du Jura de Ferrette et le jeu des accidents de type « Pontarlier ». La direction N125, plus importante à l'échelle du Jura, induit les plis de la Haute-Chaîne à l'Oligocène, puis leur accentuation, et le chevauchement du Jura sur la Bresse à la fin du Miocène.

Dans le but d'étudier la fracturation de l'enveloppe calcaire du gisement des schistes bitumineux du Toarcien (schistes-carton), Guy Forestier (né en 1949) et Christian Verez ont mesuré 19 000 diaclases sur le plateau d'Ornans (FORESTIER & VEREZ, 1978). Ils montrent que la densité de fracturation augmente dans les zones de déformation les plus intenses comme le prolongement de l'accident de Vallorbe-Pontarlier vers le nord. *L'Étude structurale du Jura neuchâtelois (Suisse)*, diplôme de master de l'Université de Fribourg de Thibaud Rey, avait pour objectif :

« la mise en évidence du régime cassant de surface dans la chaîne de montagnes du Jura plissé, ainsi que la présentation d'un modèle cinématique tectonique de la région du Jura neuchâtelois. » (REY, 2015, p. 15, non publié).

La base du travail repose pour une part sur les données de A. SOMMARUGA (1997), sur la présence des failles et des décrochements figurés sur les cartes géologiques éditées de l'Atlas géologique de la Suisse au 1:25 000 et sur la modélisation numérique de terrain (MNT), qui font apparaître des traces de chevauchements, de failles et de décrochements dont la cartographie n'est pas intégrée dans un atlas national.

L'auteur établit ainsi deux inventaires de failles présentes dans la zone étudiée, l'un à partir des cartes géologiques, l'autre à partir du modèle numérique de terrain haute résolution, examinés en fonction d'éclairages différents, permettant de cartographier des différences de contrastes; certains de ceux-ci, ponctuels, sont associés à des groupes de dolines alors que d'autres linéaments sont considérés représenter des failles. Le résultat de cette méthodologie est présenté dans le travail de master (fig. 95); il couvre la zone voisine du Creux du Van bien adaptée pour faire apparaître les traces d'accidents morphologiques à une altitude située au-dessus des apports glaciaires alpins de la dernière glaciation. En revanche, l'application de cette technique à l'analyse de la fracturation dans la majeure partie du Jura neuchâtelois paraît peu appropriée du fait que les formations mésozoïques sont très souvent recouvertes par des moraines ou des éboulis récents, comme l'attestent les secteurs au nord-ouest de la figure (Travers) ou au sud-est de la figure. Pour éviter ces désavantages, l'auteur entreprend l'analyse d'affleurements de qualité assez étendus et complète cette approche par l'analyse des traces de chevauchements en utilisant les mêmes méthodes (données issues des documents cartographiques officiels et exploitation de photos aériennes). Néanmoins, dans le Jura, cette analyse paraît plus délicate du fait que les chevauchements présentent souvent de faibles pendages et qu'ils sont souvent associés à des assises de même orientation; leur analyse et localisation précise par le moyen des photos aériennes et modèle numérique de terrain paraît ainsi très problématique. Les résultats de cette première recherche montrent que la détermination de fractures par analyse de linéaments sur un modèle de terrain numérique haute résolution donne de bons résultats. Ils s'étendent sur une importante surface, où sont distinguées les traces des pro-charriages et des retro-charriages et les différentes familles de fractures et de décrochements (fig. 96).

8. 4. Stylolites et dissolution – recristallisation

C'est J. Thurmann qui fut le premier géologue jurassien à aborder l'étude de ces structures en 1857. Malheureusement, il les considérait liées

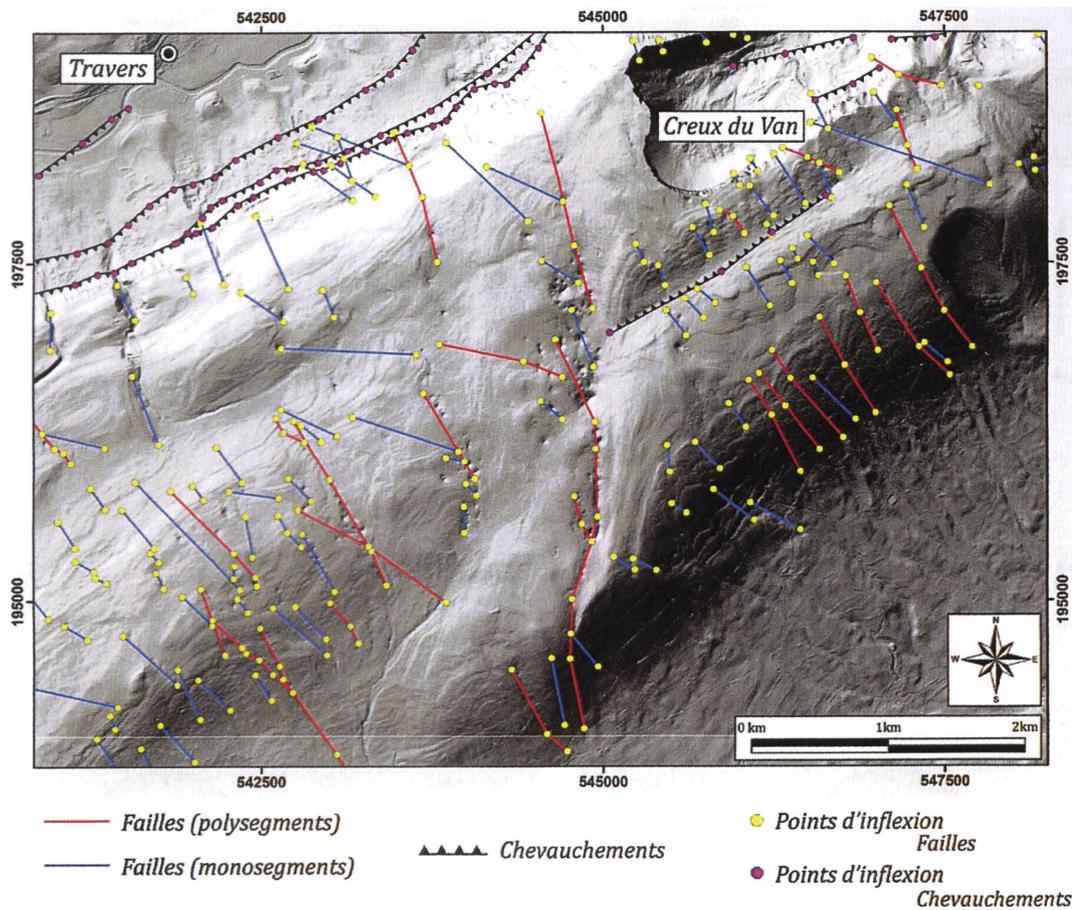


Fig. 95 : Carte tirée du résultat de la détermination cartographique des failles et des chevauchements sur fond de modèle numérique de terrain, au sud du Val de Travers (canton de Neuchâtel). Chaque segment (traits bleus) est délimité par deux points terminaux. Dans le cas où une faille de plus grande dimension est composée de plusieurs segments, elle forme un objet polysegmenté délimité par plusieurs points d'inflexion, et pouvant être interprété à grande échelle comme un linéament (traits rouges). Extrait de T. Rey, en 2015, figure 28, page 62.

à un phénomène d'extension, et son approche fut assez rapidement oubliée. Par la suite, l'allemand Max Jacob Pfanenstiel (1902-1976), aborde le rôle de ces structures dans la chaîne du Jura en 1958. Il y indique que les niveaux calcaires du Jura ont subi d'importantes réductions de volume par les effets de la dissolution sous pression induite par l'augmentation de la charge sédimentaire. Aux stylolites verticaux générés par ce phénomène se sont ajoutés les stylolites horizontaux liés aux effets des pressions tectoniques, permettant d'expliquer la réduction de l'épaisseur des couches situées sur

les flancs redressés par rapport aux épaisseurs de ces mêmes couches observées au niveau des charnières. L'auteur semble admettre que dans le Jura, où s'observe une géométrie de plis de type similaire, les dissolutions sous pression, avec stylolites verticaux et horizontaux, ont entraîné la dissolution du tiers de la masse rocheuse qui était présente dans cette partie de la chaîne avant son plissement. Dans l'article évoquant les stylolites horizontaux du Jura tabulaire et plissé franco-suisse ainsi que leur signification dans le cadre régional, l'allemand Werner Plessmann (1928-1972) commente la

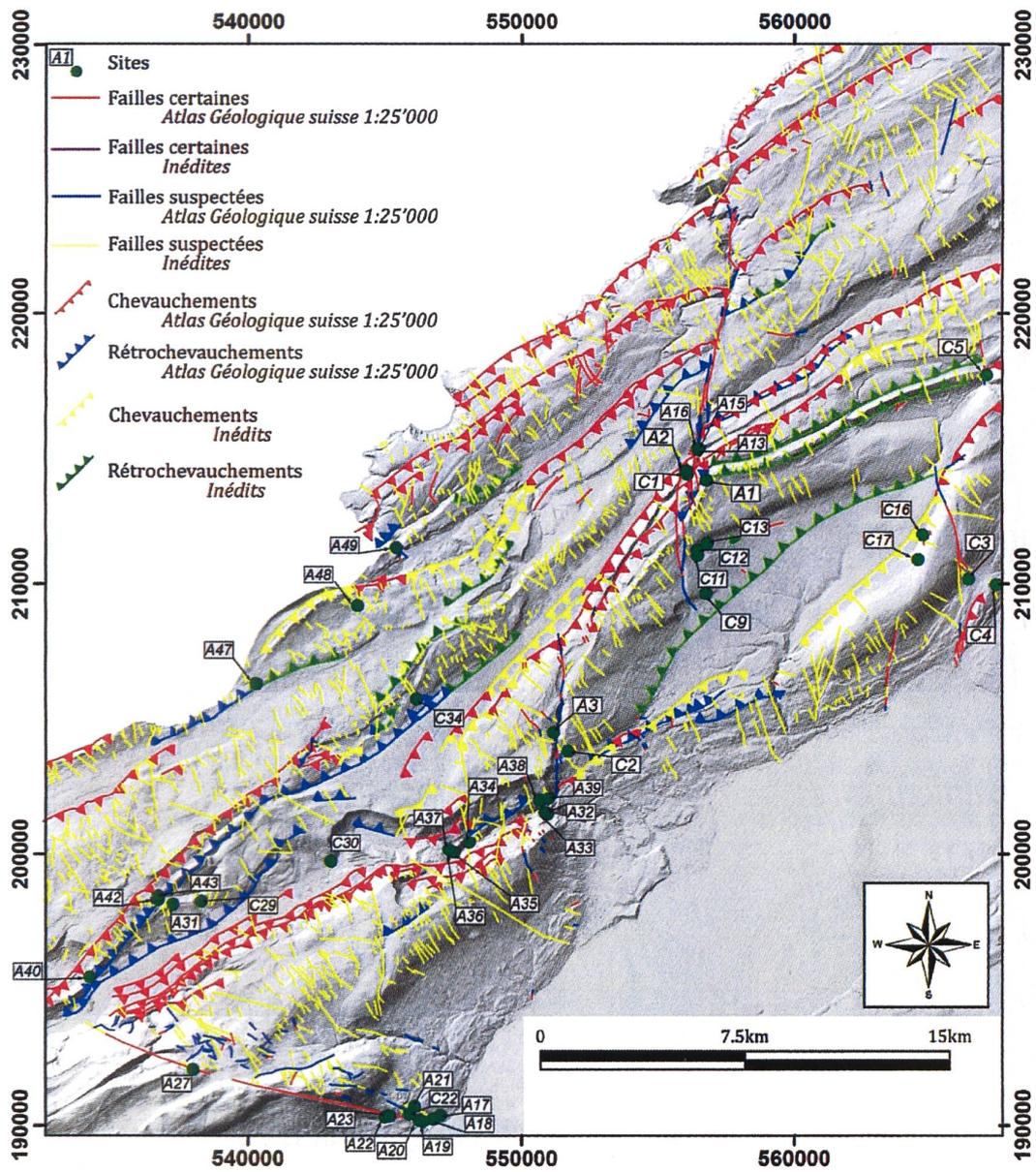


Fig. 96 : Carte structurale établie sur fond de modèle numérique de terrain montrant la position des chevauchements et la distribution de la fracturation, ainsi que les grandes zones décrochantes. Extrait de T. Rey en 2015, page 161 en annexe.

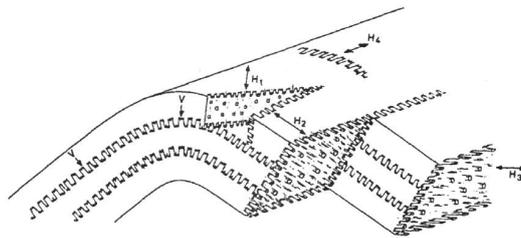


Fig. 97 : Formation des stylolites distinguant ceux d'orientation verticale formés par la surcharge des couches sédimentaires et ceux formés à l'horizontale par les contraintes tectoniques. Extrait de W. PLESSMANN en 1972, fig. 5, page 342.

formation de ces structures en distinguant les stylolites d'orientation verticale formés par la surcharge des couches sédimentaires et ceux formés à l'horizontale par les contraintes tectoniques (fig. 97). Dans le Jura, l'auteur a mesuré l'orientation de quelque deux mille colonnettes de stylolites, regroupées par station, dans des couches subhorizontales; il a indiqué aussi l'orientation des couches où ces mesures furent prises (et éventuellement l'orientation des plis voisins). Dans un secteur limité, ces données font généralement apparaître une direction très dominante, parfois deux (fig. 98); en regroupant ces données sur la carte des plis de la chaîne établie par A. Heim en 1919 (fig. 99), on constate que l'orientation des pics stylolitiques est perpendiculaire aux plis voisins, et présente ainsi, pour l'ensemble du Jura, une disposition en éventail. Les secteurs des grands décrochements (Pontarlier et Saint-Cergue par exemple) sont marqués par des directions de stylolites plus variables qui se trouvent également accentuées dans les environs de Besançon; pour l'auteur, cette dernière situation serait liée à la présence de deux générations de stylolites; les plus anciens présents dans la zone bordière et au-delà des limites de la chaîne, auraient été formés avant le plissement dans des roches qui furent ultérieurement soumises à la contrainte du plissement du Jura en y formant une seconde génération de stylolites.

Dans la région de Chambéry à l'extrémité méridionale du Jura, la chaîne avec des plis de direction NNW rencontre les unités chevauchantes des chaînes subalpines orientées NNE-SSW. Dans les deux chaînes, la déformation des calcaires mésozoïques est marquée par des plis et des stylolites

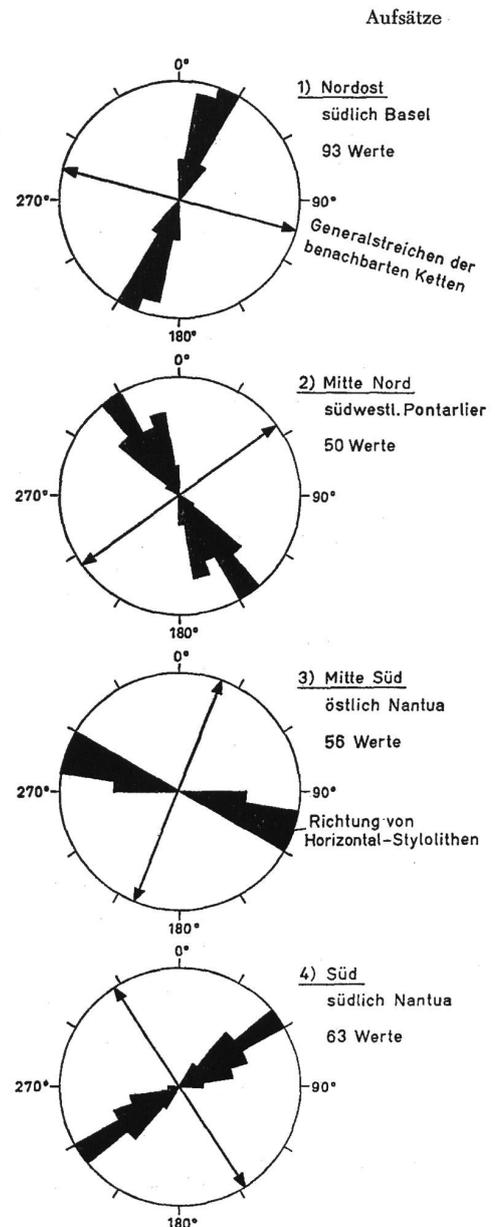


Fig. 98 : Orientation de 2000 colonnettes de stylolites horizontaux regroupées par station. Extrait de W. PLESSMANN en 1972, figure 3, page 340.

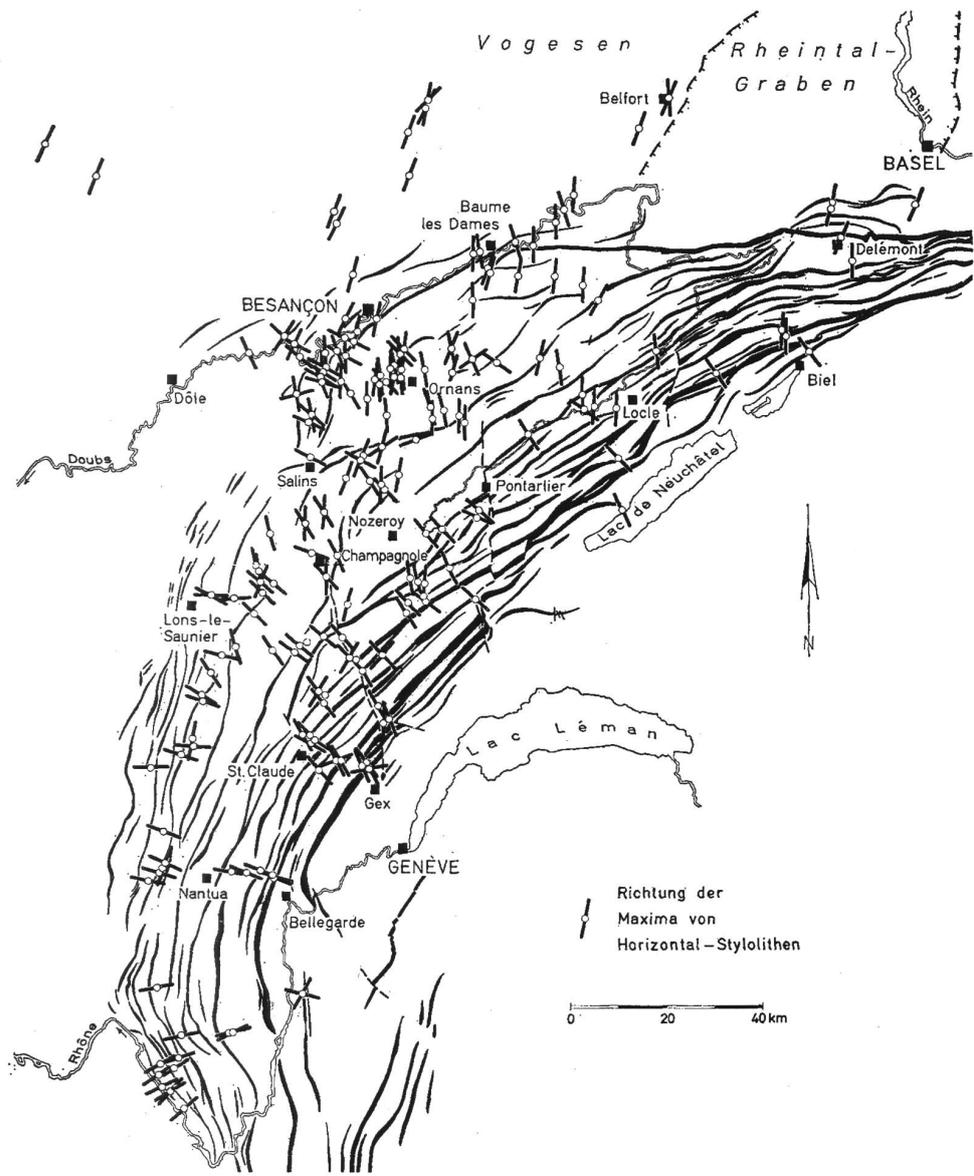


Fig. 99 : Orientations des stylolites reportées sur la carte des plis de la chaîne établie par A. Heim en 1919. Extrait de W. PLESSMANN en 1972 figure 6, page 344.

ainsi que par des veines de calcite orientées perpendiculaires à ces deux éléments structuraux. L'orientation de l'ensemble de ces éléments structuraux dans ces deux chaînes voisines est assez semblable. Le Suédois Maurits Lindström (1932-2009), qui a analysé la déformation de ces deux unités structurales contiguës, s'interroge pour savoir si les orientations structurales des deux domaines sont le résultat :

- a) d'un même événement tectonique avec une zone de passage graduel entre les deux domaines,
- b) d'événements indépendants affectant chacun son propre domaine,
- c) de deux événements tectoniques séparés mais affectant l'ensemble des domaines (LINDSTRÖM, 1962).

Dans leur thèse, J. P. SOPENA & J. P. SOULAS (1973) remarquent que les stylolites verticaux sont généralement perpendiculaires aux axes anticlinaux et indépendants du pendage des couches, démontrant que le raccourcissement par dissolution est postérieur au plissement. Ils remarquent également parfois deux générations de stylolites horizontaux, attestant deux phases de basculement des couches. Dans des considérations générales de son étude de 1979, H. P. Laubscher souligne qu'à son avis, les dissolutions accompagnant la formation des stylolites, si importantes pour assurer le phénomène de plissement dans le Jura, ne conduisent pas à une exportation conséquente de calcaire hors du système (LAUBSCHER, 1979). En effet, ce phénomène est accompagné par la précipitation de calcite dans l'environnement proche des zones de dissolution. Pour l'auteur, cette prise de position est confirmée par des mesures précises de volume, pratiquées dans des affleurements plissés particulièrement bien exposés, montrant ainsi que le plissement n'est pas accompagné par une diminution de volume. Il considère que la quantité de calcaire en solution qui quitte la chaîne sous les effets du plissement, est très limitée. En 1971, André Droxler (né en 1953) et Jean-Paul Schaer ont analysé des plis métriques à décimétriques dans les calcaires du Jura neuchâtelois; les uns proviennent de calcaires hauteriviens situés sur le flanc nord du Val de Travers, dans des affleurements déjà étudiés par H. Schardt en 1905b, les autres ont été prélevés dans des calcaires micritiques de la base de l'Argovien, dans des affleurements

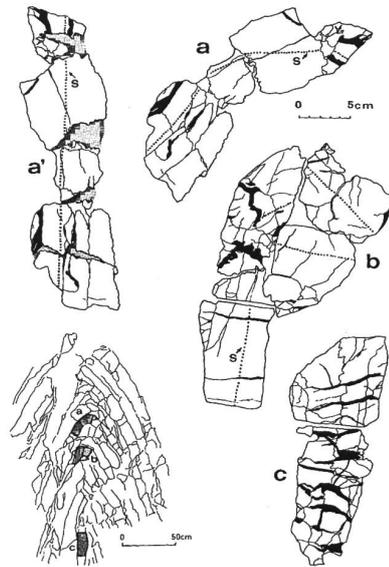


Fig. 100 : La ligne pointillée représente les discontinuités de la stratification avec mise en évidence de l'importance des rotations et des dissolutions sur la bordure des fragments. En bas à gauche, position des échantillons analysés. À droite a, b, c : analyse des surfaces polies, avec en noir les veines d'extension remplies de calcite. Dans les échantillons a et b est soulignée par une ligne pointillée la trace de la stratification s. Ces lignes soulignent que le plissement se produit par rotation de fragments rigides (a et b). En a' l'échantillon a a été redressé, ce qui permet d'apprécier les surfaces dissoutes (surfaces grisées). Extrait de A. DROXLER et J.-P. SCHAER en 1971.

proches de la localité des Frêtes entre le Col des Roches et Les Brenets (DROXLER & SCHAER, 1971). Une première analyse de l'affleurement des calcaires hauteriviens montre que de très nombreuses cassures perturbent la continuité des strates. La fig. 8b de la publication (fig. 100) souligne les discontinuités de la stratification par une ligne pointillée lorsqu'on passe d'un fragment à ses voisins, montrant ainsi l'importance des rotations et certainement des dissolutions sur leur bordure. En 8a, les plages grisées figurent l'importance de la dissolution alors qu'en 8c le remplissage des fissures par de la calcite secondaire souligne l'extension produite au niveau du flanc d'un anticlinal. Les détails de l'évolution de la surface polie d'un pli synclinal sont présentés en fig. 9 (fig. 101) avec ses zones de dissolution (grisé) et les veines à remplissage de calcite (en noir). La figure 6 (fig. 102) présente l'ouverture en V d'une fissure dans ces calcaires biodétritiques avec

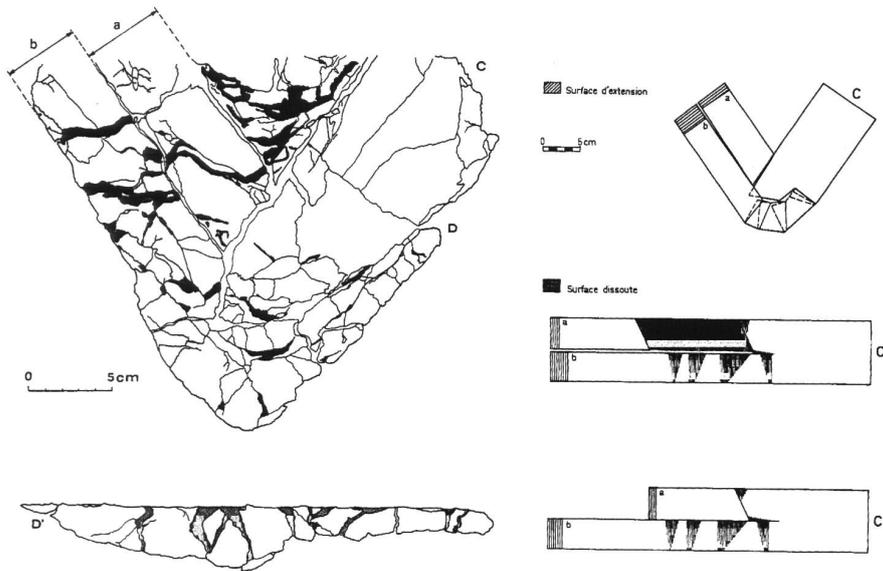


Fig. 101 : Détails de l'évolution de la surface polie d'un pli synclinal. La couche C, sous l'effet du plissement, se divise en deux sous-couches a et b. Le fond du synclinal est marqué par une couche D qui a été dépliée en D' pour souligner l'importance des surfaces dissoutes (surfaces grisées). Extrait de A. DROXLER et J.-P. SCHAEER en 1971.

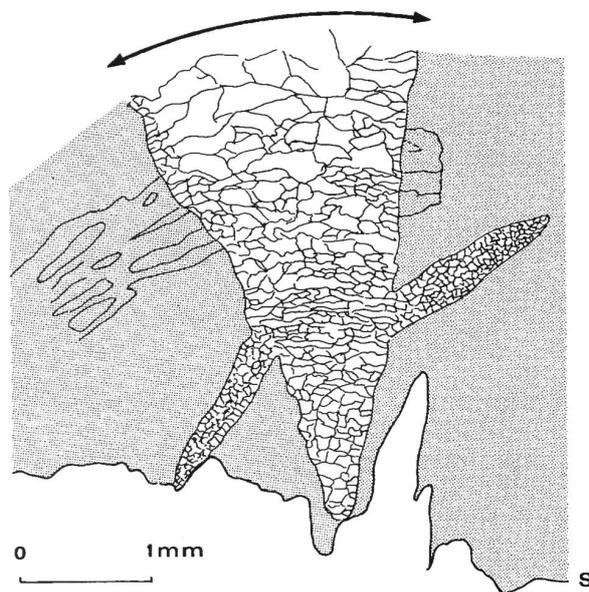


Fig. 102 : Ouverture en V d'une fissure dans des calcaires biodétritiques avec formation de cristaux allongés transversaux. La forme allongée des cristaux de calcite et leur arrangement évoquent la rotation des parois l'une par rapport à l'autre. Un fragment de bryozoaire, une ancienne veine confirme la rotation. La veine en V butte à sa base sur un joint stylolithique. Extrait de A. DROXLER et J.-P. SCHAEER en 1971.

formation de cristaux allongés transversaux permettant de suivre leur croissance au cours de l'ouverture de cet espace par la rotation relative des fragments qui l'encadrent. Cette illustration montre que la croissance des cristaux de calcite accompagne insensiblement l'ouverture et la rotation des parois de cette fissure. Par un regard rapide, les plis des calcaires étudiés se présentent comme des structures continues évoquant la plasticité des matériaux dont ils sont formés. Dans le détail, ils montrent en fait une mosaïque de blocs disloqués par la déformation, ultérieurement ressoudés pour donner une image de déformation plastique. En suivant les propositions de J. GRAMBERG (1965), il est proposé de désigner ce type de déformation sous le terme de « *déformation cataclastique plastique* » soulignant ainsi l'importance de la déformation fragile qui donne pourtant à l'ensemble un aspect de déformation plastique. Des recherches ultérieures devraient permettre de mieux situer les mécanismes de la déformation dans le Jura des marno-calcaires, des marnes et des niveaux dolomitiques.

8. 5. Les paléocontraintes et le champ de contraintes actuel

Introduites dans les années 1980, de nouvelles techniques d'analyse et de calculs des paléocontraintes permettront de mieux exploiter les observations sur les nombreuses failles portant des stries de glissement. En effet ces méthodes mettent en évidence un, voire des champs de contraintes hérités. La superposition locale de plusieurs générations de stries, ainsi que les relations d'intersection de plusieurs générations de failles permettent d'établir une chronologie relative d'événements cassants dans l'ensemble de l'arc du Jura. Dans son travail de thèse, Catherine HOMBERG (1997, p. 5 et 6), en analysant plus de deux cents sites dans le Jura et en compilant les travaux déjà existants (Xavier TSCHANZ, 1990; TSCHANZ & SOMMARUGA, 1993; PHILLIPPE, 1995; PHILLIPPE *et al.*, 1996), identifie

« quatre phases tectoniques [...] (1) une compression N-S, en régime essentiellement décrochant, datée de l'Éocène, (2) une extension WNW-ESE à NW-SE, corrélée à l'épisode distensif qui a affecté la

plate-forme européenne à l'Oligocène, (3) une phase mineure d'extension NNE-SSW à NE-SW, d'âge indéfini et (4) une compression débutant par un régime décrochant, suivi d'un régime inverse, lors de l'épisode majeur de structuration du Jura au Mio-Pliocène. La disposition en éventail des directions de compression de cette phase, de N045° dans la partie sud de la chaîne à N170° dans la partie nord, est à relier au phénomène de poinçonnement du Jura par le Bassin Molassique Suisse et/ou les Alpes. Lors de ces différents épisodes, les discontinuités héritées des événements antérieurs ont localisé les déformations, soit par réactivation des anciennes failles, soit par initiation de nouvelles structures. [...] Les déviations horaires et antihoraires de la direction de compression MioPliocène dans la région du décrochement Pontarlier, ainsi que l'existence locale de deux directions de compression, ont été interprétées en termes de deux étapes de déformation; lors de la première, cet accident n'est pas encore exprimé dans la couverture et le champ de contraintes est homogène. Lors de la seconde, le mouvement sénestre du décrochement de Pontarlier engendre une distribution hétérogène des directions de compression. Ce dernier exemple illustre que, à un même endroit, des états de contraintes différents peuvent résulter d'un événement tectonique unique. »

Ces résultats convergent avec d'autres travaux à la jonction du Jura septentrional au Fossé rhénan adjacent (Kamil USTASZEWSKI & Stefan M. SCHMID, 2006, 2007; Herfried MADRITSCH *et al.*, 2008, 2009) ou encore dans la partie la plus orientale du Jura (MADRITSCH, 2015). Il y a toutefois une divergence sur le rôle et la nature des grands accidents décrochants. Alors que C. Homberg évoque la possibilité que la faille de Pontarlier se développe lors de la formation du Jura, d'autres auteurs tels que Thomas AFFOLTER (2003) ou encore H. P. LAUBSCHER (1965) considèrent que cette dernière et par conséquent toutes les grandes failles décrochantes sont d'anciennes failles héritées Mésozoïque voire Cénozoïque initial, qui ne subissent pas de déformation si ce n'est de la translation et de modestes rotations verticales.

Si la comparaison entre le champ de paléocontraintes associées au plissement-chevauchement du Jura et la déformation finie enregistrée par les stylolithes (Tectonique, chapitre 8.4.) semble

pertinente, le lien entre le champ de contraintes hérité et le champ de contraintes actuel reste difficile à établir, car peu nombreuses sont les données qui le mettent en évidence. Rares sont les mesures directes de contraintes et les mécanismes au foyer de tremblements de terre. Dans sa revue des connaissances sur ce sujet, Anfried BECKER (2000) montre des valeurs de contraintes principales compressives plus fortes dans la Haute-Chaîne et le champ de contraintes de la couverture décollée semble être découplé de celui du socle. L'orientation de la compression, quant à elle, varie avec l'orientation de l'arc jurassien de nord-sud dans le Jura oriental à est-ouest dans le Jura méridional; la valeur moyenne se situant autour de NW-SE. On peut aussi citer les travaux de Paul BOSSART (né en 1956) et Séverine WERMEILLE (2003a), mettant en évidence les variations locales de l'orientation des contraintes principales, ainsi que la compilation récente de Olivier HEIDBACH et John REINECKER (2013).

8. 6. Âge du plissement

L'intérêt de dater le plissement du Jura se marque assez tôt parmi les géologues actifs dans cette chaîne. Les discordances qu'Auguste de Montmollin pense observer entre le Jurassique et le Crétacé, ainsi qu'entre le Crétacé et la Molasse de la région de Neuchâtel, confirment les vues de Léonce Élie de Beaumont qui considère que les sédiments crétacés et ceux de la Molasse se sont déposés dans le fond de vallées dont les crêtes environnantes formaient alors des îles ou des presqu'îles (DE MONTMOLLIN, 1835). La morphologie ainsi évoquée pouvait être considérée comme étant la trace des premiers indices de la structuration de la chaîne. J. Thurmann comme A. Gressly admettent que le plissement des terrains jurassiques est associé aux soulèvements qui ont conduit à la formation de la chaîne. Pour A. Gressly encore, ces événements sont associés aux manifestations sidérolitiques qui ont précédé les dépôts continentaux et marins des temps tertiaires. Cette proposition ne peut être retenue car les observations faites dans les synclinaux internes du Jura et sur la bordure de la chaîne avec le Bassin molassique montrent que ces sédiments sont souvent fortement redressés, comme le sont les assises jurassiques ou crétacées sur lesquelles ils s'appuient en concordance; cette

situation suggère que l'ensemble des sédiments d'âge secondaire et tertiaire a été plissé sans qu'il soit possible d'envisager un plissement généralisé de la chaîne antérieurement au Tertiaire supérieur.

Pour A. Heim, Jean-Baptiste Greppin doit être considéré comme l'auteur qui, le premier, a mis de l'ordre dans cette question (GREPPIN, 1870). Pour ce dernier, durant l'Helvétien (Miocène moyen)

«Les courants d'eau douce de cette époque, à direction N.-S., sortant des Vosges ou du Schwarzwald, déposaient indistinctement sur le continent et dans la mer les matériaux qu'ils tenaient en suspension, comme le prouvent les sables à Dinotherium du val de Delémont et les sables à Ostrea longirostris de Corban, d'Undervelier, de Court et de Cortébert. Si ces matériaux vosgiens ou hercyniens ont ainsi pénétré dans le Jura, nous en tirons la conséquence bien naturelle que nos chaînes n'existaient pas. Alors le Jura était donc peu accidenté. [...] cet état de choses a été profondément modifié. [...] le sol, de plat qu'il était donc, s'est vu transformé en 15 chaînes de montagnes principales, se dirigeant, en règle générale, de l'est à l'ouest, et embrassant un grand nombre de vals longitudinaux qu'elles relient par des déchirures transversales» (GREPPIN, 1870, p. 235).

L'idée de la structuration du Jura au cours du Tertiaire tardif est confirmée par la présence de dépôts oehningiens (Miocène moyen, -13 millions d'années env.) qui se trouvent pris sous les charriages du Jura oriental et par les couches lacustres oehningiennes du synclinal du Locle qui sont plissées et redressées avec les formations mésozoïques. De même, les formations les plus anciennes du Quaternaire – les *Deckenschotter* – reposent, sans être disloquées, ni dérangées, sur la tête des dépôts tertiaires redressés :

«La phase du plissement intense du Jura, avec ses chevauchements, ses décrochements, et tout l'ensemble des phénomènes résultant de la poussée horizontale alpine n'a pu se produire que pendant le Pontien [actuel Messinien] et le Pliocène. Dès le Quaternaire ancien elle paraît achevée.» (FAVRE & JEANNET, 1934, p. 56).

La découverte dans le flanc sud de l'anticlinal de la Vue des Alpes d'une importante veine karstique non disloquée, contenant une abondante faune de

micromammifères a pu être rapportée au Pliocène moyen, et plus précisément au Ruscinien (Biozone MN15)², datant d'environ 3 millions d'années. Thomas Bolliger et ses collaborateurs apportent, dans cette partie du Jura, une première datation paléontologique incontestablement postérieure à la structuration d'un important anticlinal de la chaîne (BOLLIGER *et al.*, 1993). Elle précise que l'édification de la chaîne du Jura doit s'être produite entre -10 et -3 millions d'années.

Discordance et séries conglomératiques du Jura durant le Tertiaire

Les affleurements de sédiments tertiaires dans le Jura, souvent dispersés, peu étendus et couverts par la végétation, ne rendent pas facile l'interprétation du cadre structural dans lequel ils ont pris naissance. Par leur variabilité, ils évoquent une période beaucoup plus troublée que ne furent celles qui avaient prévalu dans ce secteur au cours des époques jurassiques ou crétacées.

Au début du Tertiaire, les dépôts sidérolitiques rencontrés au front de la chaîne alpine attestent que des conditions continentales assez semblables, s'étendent sur un vaste domaine dont une partie seulement sera incorporée ultérieurement à la chaîne du Jura. Conservés sous forme de dépôts sidérolitiques, parfois stratiformes mais souvent en poches karstiques, ils sont le reflet d'une érosion dont le mur est situé au niveau du Cénomaniens dans les environs de Genève, pour s'enfoncer jusqu'au Kimméridgien dans le Bassin de Delémont (fig. 103). Après ces dépôts continentaux de l'Éocène qui s'étendent sur un territoire dépassant largement la future chaîne du Jura, les dépôts tertiaires préservés dans la chaîne et sur sa bordure ont très souvent des caractéristiques marquées par des influences locales, montrant que le Jura n'a pas encore acquis son identité structurale.

² La biozonation MN (Mammifères néogènes) se base sur la succession des faunes de mammifères et sur l'évolution des structures des dents de micromammifères au cours du Miocène et du Pliocène. C'est en 1975 que le paléontologue Pierre Mein a défini dans le Néogène méditerranéen cette succession de standardzones à Mammifères numérotées de 1 à 18. En 1980, le paléontologue Claude Guérin a complété la définition de la zone 18 et reconnu une série de zones quaternaires numérotées de 19 à 26 (biozonation MNQ).

Durant l'Oligocène, l'évolution générale du domaine situé au front des Alpes, donc du Jura, est localement marquée par la subsidence du Fossé rhénan et de la Bresse en même temps qu'elle subit l'influence du Bassin molassique qui s'étend et s'approfondit. Entre les zones de bordure de la future chaîne du Jura, l'évolution apparaît comme particulièrement complexe; elle est marquée par une variété de dépôts dont la continuité et surtout la préservation sont directement liées à la proximité de ces zones bordières subsidentes. D'autre part, à l'intérieur de la chaîne, on ne dispose que d'affleurements dispersés, dont les datations paléontologiques sont encore souvent incertaines bien que les recherches de ces dernières décennies aient sensiblement modifié cette situation, grâce aux dents de micromammifères et aux oogones de charophytes.

Dans la région du Locle et dans le bassin de Delémont, les sédiments oehningiens du Locle (D. KÄLIN *et al.*, 2001) évoquent la présence de fréquentes zones de marais bordant un lac peu profond où s'est maintenue une nette subsidence. Grâce aux très nombreuses données paléontologiques bien datées, ces auteurs proposent que les quelque 200 m de sédiments se sont déposés en moins de 500 000 ans entre 14 et 13,5 millions d'années, attestant une sédimentation et probablement une subsidence moyenne voisine de 0,4 mm/an. «*La formation du Bois de Raube est d'âge MN 9. Par conséquent, le plissement du Jura, qui affecte ces sédiments, est postérieur à 11 Ma*» (KÄLIN, 1997 p. 97). Il s'agit là des plus anciennes traces du plissement jurassien connues à ce jour. Des études récentes sur les graviers fluviaux d'âge plio-pléistocène (env. 2,6 à 3 Ma) du Sundgau («*Sundgauschotter*») et des cailloutis de la Forêt de Chaux (Tectonique, chapitre 2.1.), qui se sont déposés sur des surfaces quasi planes sur la bordure nord du Jura, au sud du Fossé rhénan et des Vosges, ont permis de mettre en évidence que ces couches de graviers sont soulevées, voire déformées (MADRITSCH *et al.*, 2010; Marzio GIAMBONI *et al.*, 2004a, 2004b; USTASZEWSKI & SCHMID, 2007). Il s'agirait là des plus récentes traces du plissement jurassien, associées à des sédiments.

Cette interprétation est corroborée par les changements du réseau fluvial au nord du Jura pendant les phases récentes de la formation du Jura et

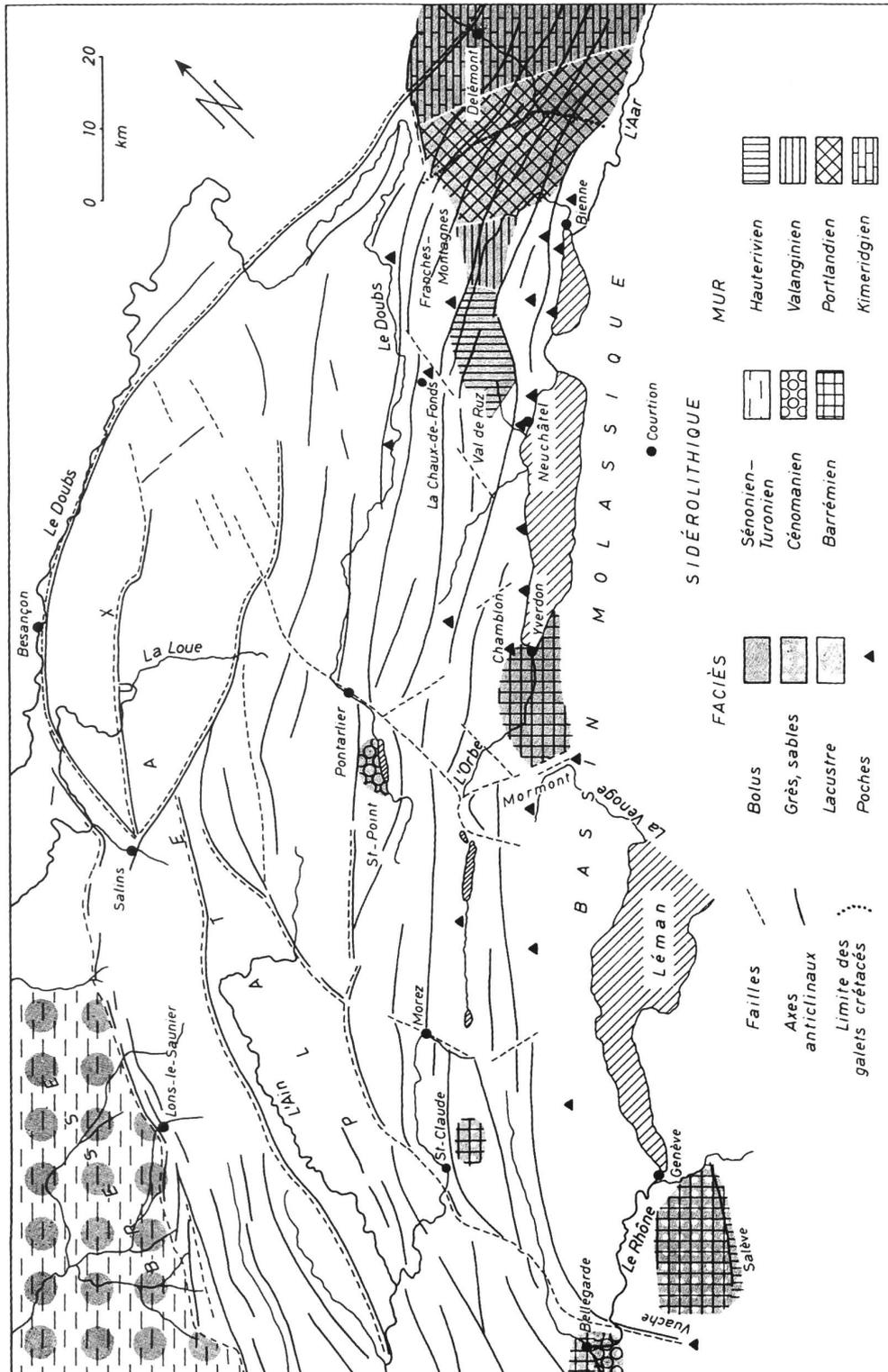


Fig. 103 : Répartitions des sédiments et des faciès éocènes. Extrait de D. AUBERT en 1975, figure 1.

suggère même que la déformation active n'est pas terminée (GIAMBONI *et al.*, 2004a). Cette déformation est à la fois engendrée par une réactivation de failles de socle dans la zone de transfert entre le fossé de la Bresse et du Rhin et une activité de la partie frontale du chevauchement du Jura (USTASZEWSKI & SCHMID, 2007).

8. 7. Les méthodes des coupes équilibrées

« The propagation of thrusting is an important problem in tectonics that is usually approached by forward (kinematical) modeling of balanced sections. Although modeling techniques are similar in most foreland fold-thrust belts, it turns out that in the Jura there are modeling problems that require modifications of widely used techniques. » (LAUBSCHER, 2003, p. 2-1).

Si H. P. Laubscher avait déjà publié (1977a, 1977b) des coupes équilibrées rétrodéformables sur des structures locales (plis et chevauchements), ce n'est que depuis les années 1990 que les méthodes d'analyse informatique ont permis d'utiliser une approche plus quantitative et systématique en y incluant les aspects cinématiques. Les nombreuses coupes à l'échelle de toute la chaîne ont ainsi permis de quantifier le raccourcissement associé à la formation de plis et de chevauchements au-dessus du décollement principal. Cette déformation varie le long de l'arc et atteint un maximum de quelque 28 km dans la partie centrale. Ces études sur l'équilibrage des coupes et la cinématique du développement des plis et chevauchements ont, par ailleurs, mis en évidence l'importance d'un second plan de décollement dans des séries argileuses, plus haut dans la série stratigraphique au-dessus des niveaux de décollement principaux dans les évaporites du Muschelkalk et du Keuper. On connaissait déjà localement des plans de chevauchements secondaires dans les niveaux argileux du Lias ou du Dogger. Des travaux récents, surtout dans la Haute-Chaîne, suggèrent l'importance d'un second niveau de décollement dans les argiles à *Opalinus* de la base du Dogger. Ceci permet d'expliquer la position structurale élevée de certains synclinaux de la Haute-Chaîne comme celui

du vallon de Saint-Imier, au nord de l'anticlinal du Chasseral (Marc SCHORI *et al.*, 2015) ou celui de la vallée de la Brévine (Valentin RIME *et al.*, 2019), ceci sans devoir invoquer une implication du socle (fig. 104). Les solutions proposées par ces deux auteurs sont donc une alternative aux modèles montrant un surépaississement des évaporites du Trias associé à un seul niveau de décollement comme présenté par A. SOMMARUGA (1997). De plus ces modèles cinématiques récents suggèrent une séquence oscillante de développement des structures, plutôt qu'une simple propagation vers l'avant.

D'autres études ont montré l'importance de ce deuxième niveau de décollement, à la base des séries du Dogger, dans la structure du Mont Terri (NUSSBAUM *et al.*, 2017) et dans la région du Hauenstein (Thomas NOACK, 1995). Dans cette dernière région, les coupes équilibrées confirment l'importante influence de la topographie du socle héritée, liée à des structures anciennes, dans la nucléation des plis et des chevauchements dans la couverture décollée, déjà évoquée par H. P. LAUBSCHER (1961, 1977a, 1986).

Quelques travaux ont tenté une analyse en 3D, tels que ceux de H. P. LAUBSCHER (1981) sur la partie orientale du Jura, de Thomas BITTERLI (1988, 1990, 1992) au Weissenstein dans la Haute-Chaîne, ou encore de Benoît VALLEY (né en 1979) *et al.* (2004) dans la vallée des Ponts dans le Jura neuchâtelois. Si l'essai de restauration de H. P. Laubscher, en 1961 déjà, ne couvrait pas le Jura méridional, les restaurations de Yann Philippe (PHILIPPE, 1995; PHILIPPE *et al.*, 1996), puis de Thomas Affolter (AFFOLTER, 2003; AFFOLTER & GRATIER, 2004) reconstituent l'ensemble de la chaîne du Jura (fig. 105). Alors que l'approche de Philippe est de type « bloc mosaic » et pseudo-tridimensionnelle avec un assemblage qui mène à des zones de recouvrements importantes au centre de l'arc, la restauration de T. Affolter en 2003 ne rencontre pas ce problème. Le modèle initial, plus détaillé, a permis une meilleure quantification des déformations et puisqu'il applique une approche de dépliage 3D des couches repères. Les deux études donnent toutefois des résultats assez comparables. T. Affolter explique que

« [...] dans le cas des chaînes d'avant-pays comme le Jura, [...] 80 % de la déformation est

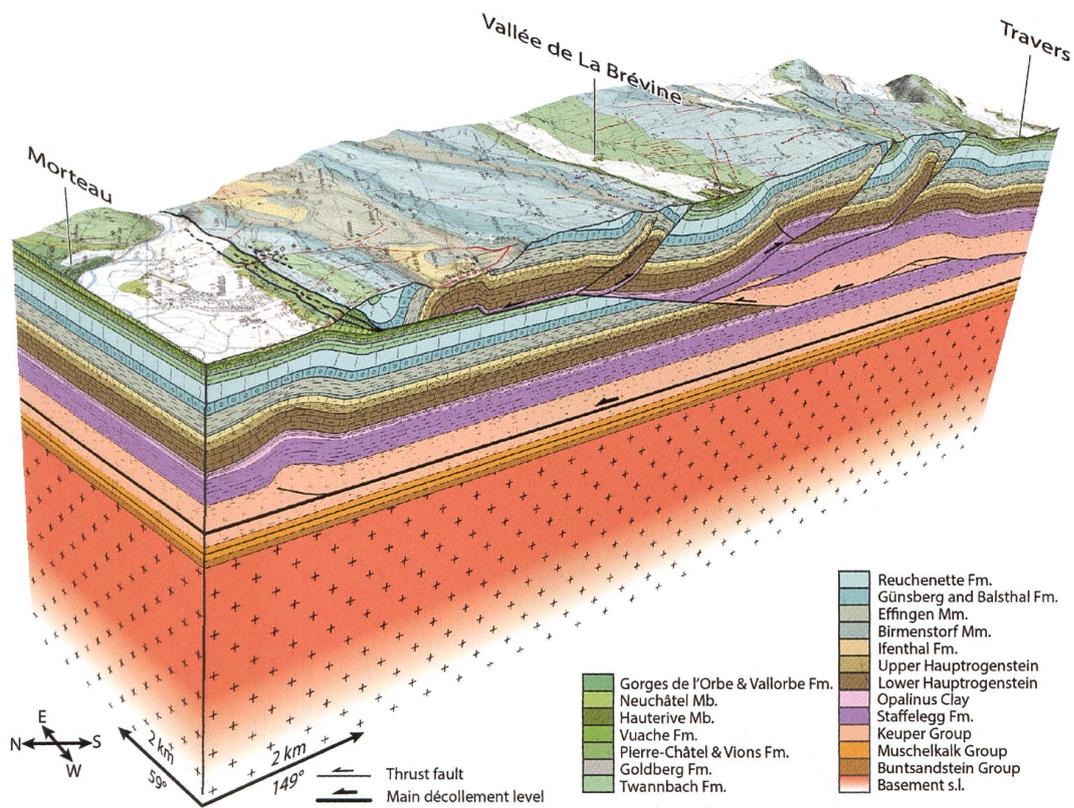


Fig. 104 : Représentation en 3D de la géologie depuis la vallée de Morteau jusqu'à Travers. Modifié d'après RIME et al. en 2019.

accommodée par des déformations discontinues (chevauchements et décrochements) [...] Notre travail de restauration montre qu'une grande partie de l'extension longitudinale nécessaire pour former l'arc du Jura est accommodée par des déplacements différentiels le long des décrochements majeurs [...]. Notre champ de déplacement prédit une extension latérale très limitée (5 %) à cet endroit (Jura méridional) [...] » (AFFOLTER, 2003, p. 84 et 86).
 « La rétrodéformation tridimensionnelle de deux horizons repères du Jura a montré que le champ de déplacement du Jura est unidirectionnel dans sa partie interne et diverge progressivement vers le front des déformations. Le changement de direction des vecteurs déplacement est très progressif, en dehors des cas de partitionnement de la déformation au niveau de failles décrochantes.

Le déplacement peut en effet être décomposé en deux vecteurs obliques de part et d'autre d'une faille décrochante. On observe également que dans l'état restauré, les vecteurs déplacement sont perpendiculaires à la trace des futurs chevauchements. En revanche, dans l'état déformé, on observe une obliquité pouvant atteindre 30° entre les plis les plus internes du Jura et les vecteurs déplacement. Cette obliquité est due au gradient de déplacement important observé à l'intérieur de la zone de déformation du Jura méridional. Ce gradient correspond à une rotation antihoraire de 30°. Les plis les plus internes du Jura méridional ont donc subi une rotation passive importante lors de la propagation de la déformation vers l'avant-pays, au contraire des plis externes du Jura méridional qui n'ont pas subi de rotation importante. On peut donc

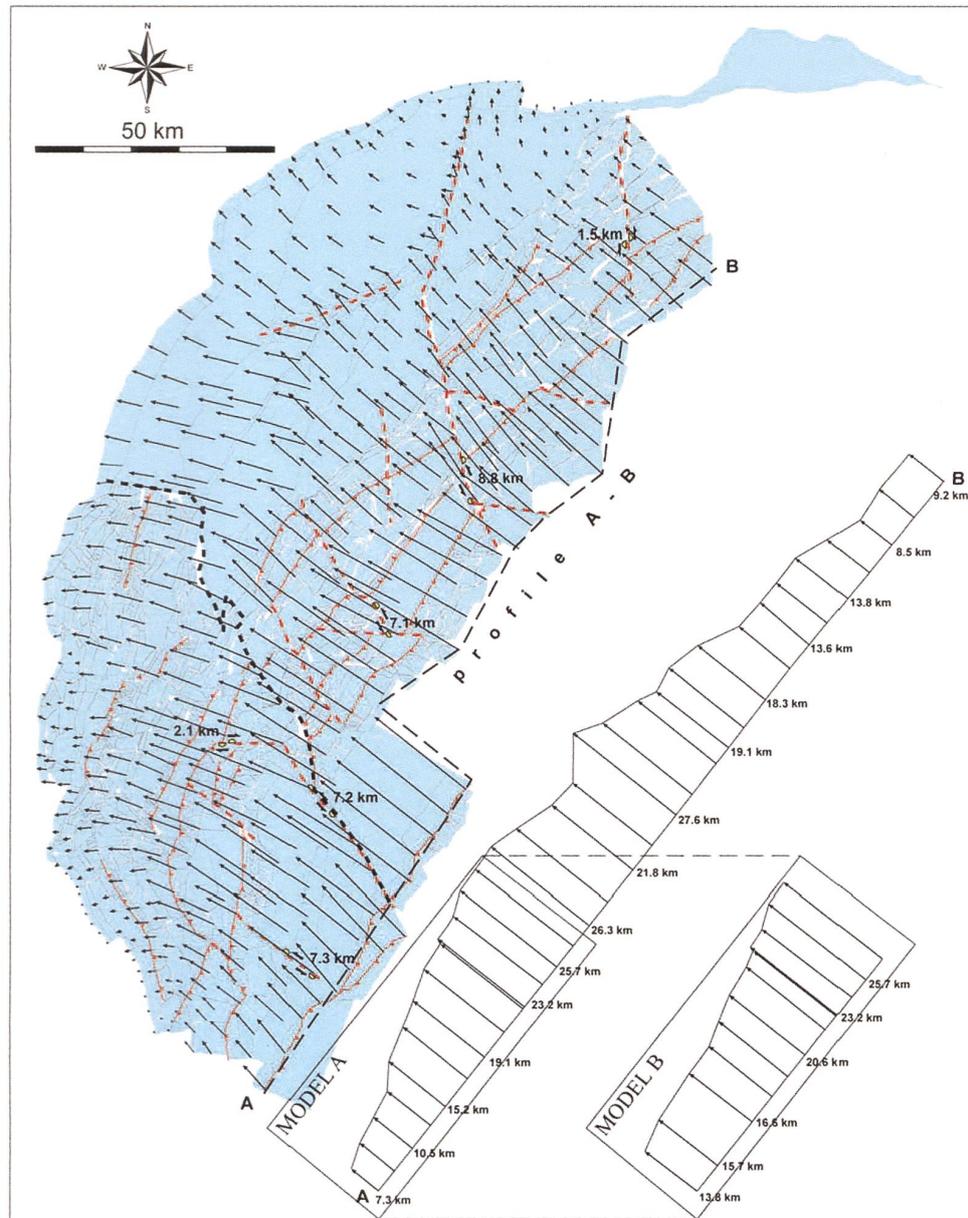


Fig. 105 : État rétrodéformé du modèle du Jura et déplacement correspondant. La ligne en pointillés noirs épais indique la limite entre les deux parties du modèle restaurées séparément. La ligne en pointillés noirs fins indique l'emplacement d'un profil NE-SW à travers le champ de déplacement. Le profil est différent selon que l'on considère le modèle A ou B. Quelques chevauchements (lignes rouges) sont dessinés dans leur état restauré, afin de pouvoir comparer leur direction avec les vecteurs de déplacement. Le décalage maximal à travers les principales failles décrochantes (lignes pointillées rouges) est également indiqué. Les points de référence à travers les failles sont représentés par des demi-cercles jaunes. Extrait de AFFOLTER (2003)

considérer que l'arc externe du Jura constitue un arc primaire, tandis que dans le Jura méridional interne, la rotation est substantielle. [...] La rétrodéformation du Jura a également permis de déterminer les valeurs de rejet relatif des principaux décrochements. L'observation des déformations dans les deux compartiments de ces failles indique qu'elles sont synchrones des chevauchements et non postérieures. Elles doivent donc être considérées comme des failles de déchirement ("primary tear faults") [sic] qui ont joué le rôle de zones de relais entre les chevauchements. Les

failles de Pontarlier et du Vuache illustrent bien ce mécanisme » (AFFOLTER, 2003, p. 139).

Les déplacements cumulés déduits par T. Affolter sont au maximum de 9 km dans le cas de la faille de Pontarlier et de 7 km dans celui de la faille du Vuache. Cette approche tridimensionnelle reste à ce jour la plus détaillée et précise; elle souligne l'importance de distinguer entre déformation finie (orientation des axes de plis et des chevauchements), contraintes et paléocontraintes et le champ de déplacements.

Chapitre 9

Les recherches modernes sur la tectonique profonde

Dans le secteur du Jura central et de la bordure du Bassin molassique, les connaissances structurales ont connu un heureux développement depuis les études de Léopold von Buch, Auguste de Montmollin, Louis Rollier, Hans Schardt et Jules Favre au cours du XIX^e siècle et du début du XX^e siècle. Puis, des forages entrepris pour la recherche de charbon ou d'eau ont apporté des données complémentaires ponctuelles illustrées par la publication de SCHMIDT *et al* (1924) sur le forage de Buix. Ensuite, l'amélioration de ces données est consécutive aux études sismiques entreprises dans le cadre des recherches pétrolières, puis à celles visant à localiser dans le Jura suisse des sites favorables pour l'entreposage des déchets radioactifs. Ces dernières recherches seront conduites par les mêmes moyens et techniques que celles pratiquées par l'industrie pétrolière, en utilisant des forages associés à des campagnes sismiques.

9. 1. Analyse du sous-sol par les forages

En Suisse et en France, après la deuxième guerre mondiale, on a commencé à explorer le sous-sol à la recherche du potentiel pétrolier. Ces recherches se sont concentrées, non pas dans la Haute-Chaîne du Jura, mais plutôt dans les Plateaux du Jura français ou au pied du Jura dans le Bassin molassique suisse (Patrick LAHUSEN, 1992). Les raisons de ce choix résident non seulement dans la localisation à plus basse altitude et donc plus facile d'accès, mais aussi parce que des suintements et des pertes de gaz à la surface dans le plateau suisse laissaient espérer des réserves exploitables.

9. 1. 1. Les forages dans le Jura suisse : Buix-1 et Risoux-1

Le forage de Buix-1 réalisé en 1917 a atteint la profondeur de 1053 m (SCHMIDT *et al.*, 1924) et a pénétré une forte épaisseur de Trias (plus de

400 m) pour s'arrêter au sommet du Paléozoïque dans les couches du Permien sans atteindre l'objectif des séries paléozoïques de charbon (voir aussi Hydrogéologie, chapitre 4.1.2.).

Les résultats du forage helvétique, Le Risoux-1, localisé dans la Haute-Chaîne à la frontière franco-suisse, ont changé la conception des anticlinaux jurassiens. Jusque-là, les auteurs considéraient les plis comme des anticlinaux simples, à cause de la continuité latérale apparente des structures étudiées à la surface. Au début du XX^e siècle, les excavations pour le tunnel ferroviaire du Mont d'Or (ligne Vallorbe – Dijon – Paris), localisé à l'extrémité est de l'anticlinal du Risoux ont révélé des complexités structurales inattendues (Louis COLLOT (1846-1915), 1913) qui sont représentées sur la coupe de Daniel Aubert de 1945 (voir fig. 94, p. 220-221). En 1961, les résultats du forage du Risoux-1 ont prouvé le concept de charriage et de redoublement de la couverture : un chevauchement sépare une série supérieure (toit), allant des calcaires du Malm (« faciès Séquanien-Rauracien ») aux marnes du Lias, d'une série inférieure (mur) allant des calcaires du Malm (« faciès Séquanien-Rauracien ») aux calcaires du Bathonien. Entre ces deux séries, il y a une série moyenne allant des roches du faciès Argovien aux roches du Lias. Bien que ce forage n'ait pas atteint le socle sous la couverture mésozoïque (roches du Dogger à une profondeur de 1958 m), il a montré des répétitions des séries du Jurassique avec la présence de trois plans de chevauchements (fig. 106). Ces résultats inattendus ont considérablement augmenté la compréhension non seulement de la géologie régionale de la Haute-Chaîne du Jura mais aussi celle de la tectonique de toute la chaîne plissée du Jura.

À la suite de la publication des résultats du forage du Risoux-1, divers auteurs ont reconsidéré leur hypothèse sur la formation du Jura : Etienne WINNOCK en 1961 et H.-P. LAUBSCHER en 1961 et 1965 ont discuté la présence d'un

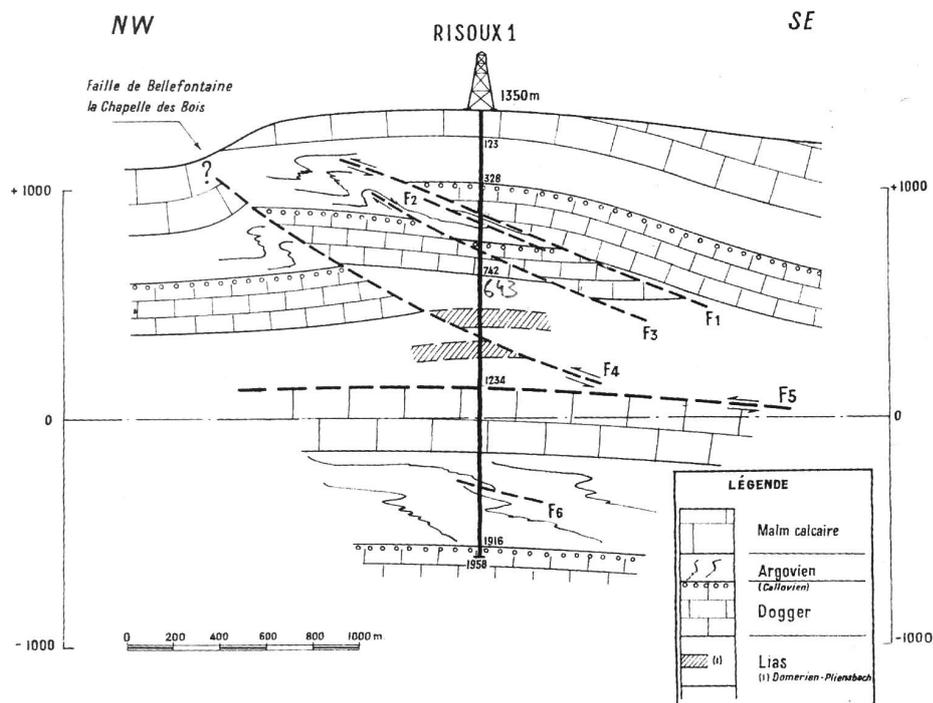


Fig. 6

Fig. 106: Coupe géologique orientée NW-SE de l'anticlinal du Risoux basée sur les résultats du forage du Risoux-1. Extrait de WINNOCK (1961).

décollement basal dans les séries des évaporites du Trias comme postulé déjà par August BUXTORF en 1916a. D. AUBERT (1971) a aussi changé son opinion sur la couverture du Jura et s'est rallié à l'hypothèse d'une couverture allochtone. À partir des seuls relevés cartographiques, en 1959, D. Aubert décrivait l'anticlinal du Risoux comme « [...] une masse inerte, à peine ébranlée par la poussée orogénique ». D. Aubert a aussi tenté de quantifier l'extension de ces chevauchements, recherche qui s'est révélée bien plus facile dès la moitié des années 1970, en ayant l'appui des résultats des interprétations des lignes sismiques. Depuis la découverte du redoublement de la couverture dans le forage du Risoux-1, les géologues structuralistes n'ont pas hésité de proposer des coupes perpendiculaires aux structures dans cette région pour expliquer la géométrie et la vergence des plis soit vers l'avant-pays avec un

regard français ou vers l'arrière-pays avec un regard suisse (WINNOCK, 1961; RIGASSI, 1962 & 1977; LAUBSCHER, 1965; AUBERT, 1971; P. BITTERLI, 1972; CHAUVE *et al.*, 1980; J. MARTIN, 1987; PHILIPPE, 1995).

9. 1. 2. Les forages dans le Jura français: exemple Laveron-1

De nombreux forages ont été réalisés dans les Plateaux ou les Faisceaux du Jura dès la fin des années 1950: en exemple, ceux de Toillon-1 (1958, -1573 m), Laveron-1 (1959, -2485 m), Valempoulières-1 (1961, -1421 m), Valempoulières-2 (1962, -1250 m profondeur) et Essavilly-1 (1964, -2067 m). Un forage de la zone de Valempoulières a été exploité et a produit 85 millions de m³ de gaz entre 1961 et 1983. De tous les forages des Plateaux, celui de Laveron-1 (BRGM, 1964), foré au sein d'un anticlinal à grand rayon de courbure et faible amplitude, a

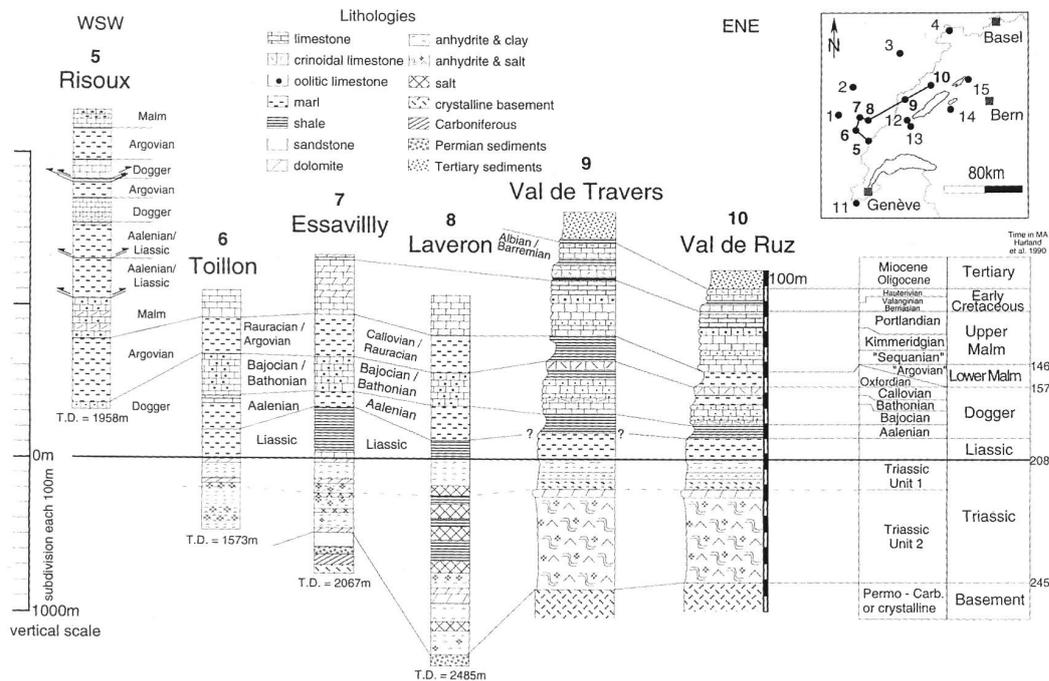


Fig. 107 : Corrélation orientée WSW-ENE des principales formations lithostratigraphiques des forages français suivants : Risoux (WINNOCK, 1961), Toillon (BRGM, 1965), Essavilly (BRGM, 1965) et Laveron (BRGM, 1964). En comparaison à droite, les logs lithostratigraphiques basés sur des relevés de terrain et des interprétations sismiques dans les vallées neuchâtelaises. Le niveau de référence correspond au toit des séries du Trias. Les lignes en trait plein correspondent aux corrélations basées sur les données de forages ; les lignes en trait pointillé correspondent aux corrélations basées sur des interprétations sismiques. Extrait de SOMMARUGA, 1997.

montré un épaississement remarquable des couches du Trias (fig. 107). Plus de 1200 m de couches d'âge triasique ont été forées ce qui représente l'épaississement maximal connu dans la région du Jura. Au sein des marnes à évaporites, plusieurs couches de sel pur atteignent au moins 450 m, tandis que les couches de gypse et d'anhydrite forment près de 250 m. Le forage s'est arrêté dans les couches du Buntsandstein, Trias inférieur. Il faut souligner qu'aucun chevauchement et qu'aucune répétition au sein des couches du Jurassique n'a été observée dans ce forage. Le forage de Laveron-1, couplé aux interprétations de profils sismiques, a permis de mettre en évidence la structure typique des Plateaux du Jura.

De nombreux autres forages dans le Jura méridional et central ont été réalisés et tous ont apporté des connaissances sur la géologie locale et ont contribué à la connaissance générale du sous-sol du Jura.

9. 1. 3. Les forages français en bordure occidentale du Jura

La structure géologique de la marge occidentale du Jura a été élucidée à la suite d'une vaste campagne de forages à grande profondeur (au voisinage de 1000 m) entre les années 1938 et 1953. Ils ont été effectués d'abord par les Mines domaniales des potasses d'Alsace pour une recherche de potasse ; puis par le BRGG (devenu BRGM) et les Charbonnages de France. La campagne de forage des années 1940 révéla la présence de gaz naturel à Revigny et de houille dans le sous-sol lédonien. Une vingtaine de forages profonds, exécutés entre 1938 et 1953, ont en effet recoupé plusieurs veines de houille dans les couches du Carbonifère entre 500 et 1000 mètres de profondeur (BONTE *et al.*, 1953).

L'exploitation et le dépouillement de la vingtaine de forages (Pierre MICHEL *et al.*, 1953) fournirent

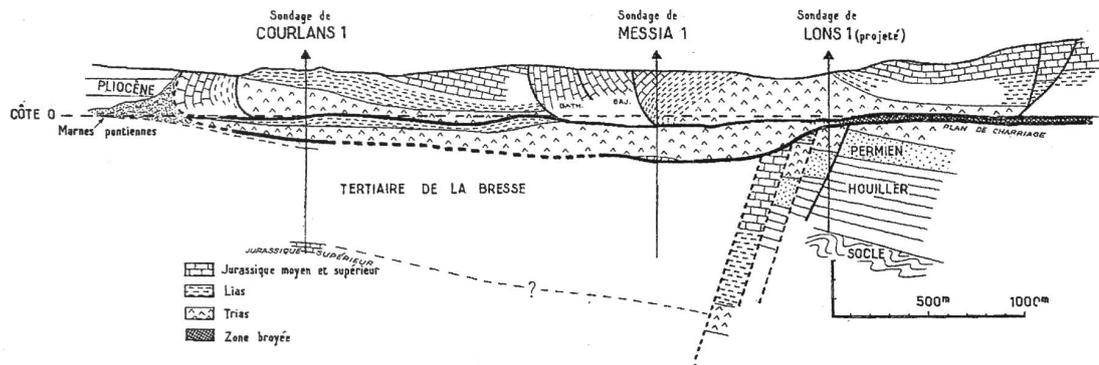


Fig. 3. — Coupe NW-SE passant par Courlans 1 et Messia 1, Lons 1 étant projeté.

Fig. 108 : Coupe géologique NW-SE, dans la zone du Vignoble près de Lons-le-Saunier, montrant le charriage de plusieurs kilomètres des couches mésozoïques du Jura sur les sédiments tertiaires du fossé de la Bresse. Cette coupe, extraite de MICHEL et al. (1953), passe par les sondages de Courlans-1 et Messia-1. Le sondage de Lons-1 est projeté.

une image tout à fait nouvelle de la structure de la bordure bressane au contact du Jura. Il s'agit d'un décollement subhorizontal du bord du Jura sur le remplissage bressan. L'amplitude du déplacement est estimée à 5 km et jusqu'à 7 km dans certaines zones. La masse charriée présente une épaisseur moyenne de 500 à 600 m et se divise en deux nappes superposées distinctes; la partie superficielle est relativement calme et les successions de terrain sont normales. Au contraire, à partir d'une certaine profondeur, les terrains sont bouleversés et se succèdent sans ordre.

« Tout se passe comme si la partie superficielle de la nappe s'était écoulée en un mouvement laminaire tandis que la partie profonde, soumise aux frottements de la surface recouverte, se serait propagée en un mouvement désordonné provoquant une sorte de brèche à très gros éléments » (MICHEL et al., 1953, p. 599).

Le décollement s'est produit au niveau du Keuper inférieur qui présente une puissance de près de 200 m dans cette zone et est riche en roches évaporitiques (sel et gypse) plastiques et peu cohérentes, constituant ainsi un excellent plan de glissement. Par ailleurs, ce niveau affleurerait dans l'abrupt de faille engendré par l'effondrement bressan à l'Oligocène. Il était donc en situation idéale pour provoquer le décollement de la masse plus rigide des calcaires du

Jurassique moyen présent au sommet de l'abrupt de faille. En dessous des couches du Keuper, la surface du plan de charriage est très irrégulière (fig. 108).

L'âge du charriage est donné par la datation des couches qu'il déforme en Bresse (BONTE, 1952). Ces dépôts ont été datés du « Pontien », étage de la Paratéthys qui est remplacé actuellement par ceux de la stratigraphie internationale, positionné assez clairement à la fin du Miocène : étage Tortonien-Messinien (entre 7 et 3 millions d'années). Il s'agit bien d'un chevauchement contemporain du plissement jurassien et son moteur ne peut être qu'une compression venue de l'est et transmise par la couverture jurassienne. Cette vision s'accorde donc bien avec les théories de A. BUXTORF (1907) et de M. LUGEON (1941) de l'indépendance de la couverture vis-à-vis du socle et de son glissement sur le socle au niveau des marnes salifères du Trias. Sans remettre en cause les grandes lignes de la structure de ce charriage, certains auteurs (LIENHARDT, 1962) en ont proposé une représentation un peu différente. Les failles séparant les lanières apparaissent nettement plus proches de l'horizontale, délimitant des écaillés se chevauchant les unes les autres.

Bien mis en évidence dans la région lédonienne, sur une trentaine de km du nord au sud (entre Vernantois et Poligny), le charriage est présent sur toute la bordure occidentale du Jura avec des formes et des extensions légèrement différentes.

Une vision plus récente se trouve dans CHAUVE *et al.* (1980, 1988).

9. 1. 4. Les forages suisses en bordure orientale du Jura

(La matière de ce sous-chapitre est discutée en détail dans la partie Tectonique, chapitre 9.3.3.). Cette région a été sondée non pas pour des raisons de recherches minières ou pétrolières mais afin de localiser des régions et des roches pour l'accueil de déchets faiblement et moyennement radioactifs. Dès 1980 et pour plusieurs années, un programme d'investigations géologiques régionales dans le nord de la Suisse avec des études sismiques, hydrogéologiques, tectoniques et des forages profonds, a été conduit par la Nagra. En 1982, le premier d'une dizaine de forages débute dans le canton d'Argovie (Böttstein-1). Suivront ceux de Weiach-1, de Riniken-1, Schafisheim-1, de Kaisten-1, de Leuggern-1, de Siblingen-1 et de Benken-1 (HINZE *et al.*, 1989, Nagra, 1992 & 2001) localisés dans les cantons de Zurich, d'Argovie et de Schaffhouse. Ces forages profonds, bien que situés en bordure du Jura plissé, ont permis de connaître l'épaisseur des lithologies de la couverture et la nature des sédiments ou des roches cristallines du socle. La découverte la plus extraordinaire et inattendue fut celle dans le forage de Weiach-1. Les géologues ont reconnu une épaisseur de 456 m de sédiments d'âge Permien, de 572 m de couches carbonifères et de 457 m de roches cristallines (Nagra, 1989). La présence de fossés d'âge Permo-Carbonifère sous la chaîne du Jura n'était jusqu'à cette découverte pas vraiment discutée.

9. 2. Interprétation des structures du Jura au moyen de l'analyse sismique

Bien que les forages aient amélioré de manière conséquente les connaissances sur la succession des couches et les faciès profonds ainsi que la structure à un niveau local et pour extrapoler ces résultats à un niveau régional, les géologues ont pu profiter dès la fin des années 1960 de l'acquisition des profils sismiques par les compagnies pétrolières. Ces

profils sont le résultat de l'avancée de la recherche dans les techniques géophysiques pour la recherche d'hydrocarbures. La méthode utilisée est la sismique réflexion qui explore le sous-sol au moyen d'ondes artificielles (ondes acoustiques). Elle est comparable à une radiographie du sous-sol le long de profils et met en valeur par des réflecteurs le contraste d'impédance acoustique des roches¹. L'interprétation des profils sismiques qui sont des coupes en temps (temps double en secondes), met en évidence la géométrie des couches du sous-sol et, couplée avec les forages, la lithologie des roches (H. NAEF & Peter DIEBOLD, 1990).

L'acquisition de profils sismiques s'est faite dans plusieurs régions du Jura par des compagnies pétrolières différentes et à des périodes distinctes. Les premières campagnes ont été entreprises par la société Shellrex de 1970 à 1974 dans le Jura central français, et ont été poursuivies dans le Jura plissé suisse du canton de Vaud de 1972 à 1974 par Shell Switzerland. Une nouvelle campagne dans le Jura plissé suisse, dans le canton voisin de Neuchâtel a été conduite en 1988 par la compagnie British Petroleum. Dès la fin des années 1980 et début 1990, dans le Jura méridional français, des campagnes d'exploration par la compagnie Esso Rep sont aussi réalisées autour des forages de Chaleyriat-1 et de Chandelière-1D. Le Jura suisse oriental (cantons de Berne, Soleure, Jura et Argovie) n'a jamais fait l'objet d'une campagne récente. La Nagra a mené plusieurs campagnes à l'extrémité orientale du Jura et dans les régions avoisinantes (Tectonique, chapitre 9.3.). En Suisse un projet de sismique profonde (PNR20) s'est surtout concentré pour une acquisition dans les Alpes (Othmar Adrian PFIFFNER *et al.*, 1997), mais dans la publication finale certains profils traversant le Jura sont présentés par Anna Sommaruga et Martin Burkhard (1957-2006) en 1997.

L'importante contribution de A. Sommaruga est basée sur l'interprétation de 1500 km de lignes sismiques tirées par différentes compagnies pétrolières à travers le Jura central depuis la région des lacs Léman et de Neuchâtel jusqu'au niveau de la bordure de la Bresse (SOMMARUGA,

¹ L'impédance acoustique correspond à la vitesse de l'onde sismique dans la roche par la densité de la roche.

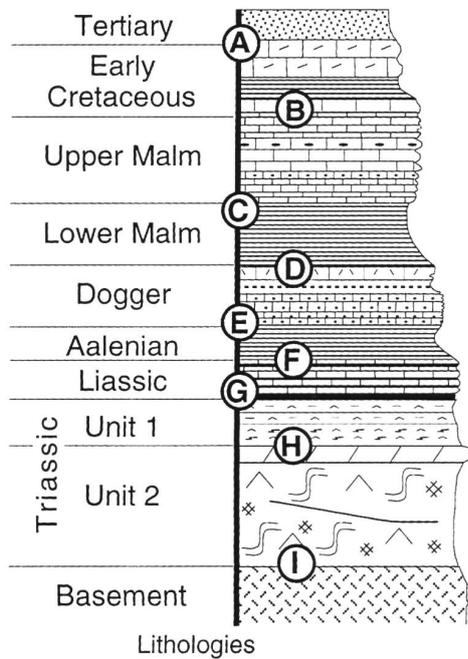
1997). L'analyse de ces documents mis à disposition par les compagnies pétrolières a permis à l'auteure d'établir la géométrie et la position de la surface de décollement de ce vaste secteur de la chaîne du Jura; celle-ci se présente comme une surface plane et régulière plongeant de quelques degrés (1 à 3°) en direction du SSE. Ce résultat confirme de façon éclatante les propositions de A. Buxtorf établies dès 1913, proposant alors le Jura comme une large nappe de terrains sédimentaires charriés et plissés, située au front de la chaîne alpine; cette nouvelle proposition est présentée alors que plusieurs chercheurs pensent que les plis du Jura sont associés à des discontinuités affectant la surface du socle. L'auteure montre que les chevauchements et les plis se sont développés à partir de la zone de décollement de faible viscosité du Trias moyen marquée par ses dépôts de sel, de sulfates et d'argilites. Au niveau des décrochements, aucun déplacement du socle n'est reconnu comme étant impliqué dans la formation des plis et des chevauchements. Dans le Bassin molassique, les niveaux évaporitiques présents n'ont pas conduit à la formation de plis ou de charriages comparables à ceux du Jura; l'importante charge d'âge tertiaire recouvrant les assises du Mésozoïque a limité les possibilités de migration des matériaux ductiles du Trias pour conduire à la formation de structures plissées. L'anticlinal du Born, au sud d'Olten, celui du Salève, au sud de Genève et celui du Gros Foug, qui borde le lac du Bourget sur sa rive est, sont des structures anticlinales majeures de type jurassien qui percent les assises de la Molasse. Ce travail place la chaîne du Jura dans l'analyse plus générale des chaînes d'avant-pays pratiquée par l'exploration pétrolière dans différentes parties du monde. A. Sommaruga s'inspire des développements structuraux proposés par John SUPPE (né en 1942) en 1983, des travaux précurseurs dans les Montagnes rocheuses canadiennes (BALLY *et al.*, 1966) et de la grande expérience du professeur Albert Walter Bally (1925-2019), dont elle fut l'élève à l'Université de Rice (Houston, Texas). Les données sismiques enregistrées dans le Jura en suivant les zones synclinales présentent des réflecteurs sismiques de bonne et même

d'excellentes qualités convenant parfaitement à l'analyse structurale régionale. La figure 109 présente une colonne stratigraphique simplifiée des assises relevées dans le synclinal du Val de Ruz (Neuchâtel) qui est mise en parallèle avec les réflecteurs sismiques enregistrés. Les réflecteurs les mieux marqués et les plus continus sont matérialisés par des lettres de l'alphabet. L'espace situé entre deux lettres successives définit une unité sismique qui est corrélée avec des unités stratigraphiques. Ainsi les calcaires du Malm supérieur se trouvent placés entre le réflecteur B de la base du Crétacé (marnes du Purbeckien) et le réflecteur C du sommet des marno-calcaires de l'Argovien.

Les recherches de terrain qui ont permis d'établir les premiers éléments de la stratigraphie régionale ont été améliorées par les résultats des forages liés à la prospection de charbon, de sel, puis de pétrole. Les données sismiques recueillies lors de la recherche pétrolière ont ensuite conduit à des améliorations sensibles permettant d'établir des corrélations au niveau régional grâce aux faciès sismiques caractéristiques intercalés entre deux réflecteurs bien marqués. Les profils lithologiques établis à partir de ces données mettent en lumière deux types de structures: les unes forment de douces et longues ondulations longitudinales, les autres marquent les systèmes complexes et étroits des anticlinaux.

Les nombreux décrochements affectant la chaîne sont assez souvent marqués par de nettes dépressions; les plus importants, de nature sénestre, sont orientés NW-SE dans la partie méridionale de la chaîne, puis NNW-SSE à N-S dans le Jura central; ces accidents majeurs sont accompagnés par des décrochements conjugués de nature dextre, orientés WNW-ESE à NW-SE. Au niveau où les décrochements recoupent les plis, ceux-ci ont souvent tendance à se terminer brusquement, suggérant un lien entre les plis et les décrochements. Dans les relevés sismiques, les traces de décrochements sont représentées par des zones transparentes, assez larges, marquées sans réflecteur. Les décrochements qui sont bien identifiables dans la couverture ne se poursuivent pas dans le socle.

Simplified stratigraphic column of the Val de Ruz



Strike line 8 along the Val de Ruz syncline

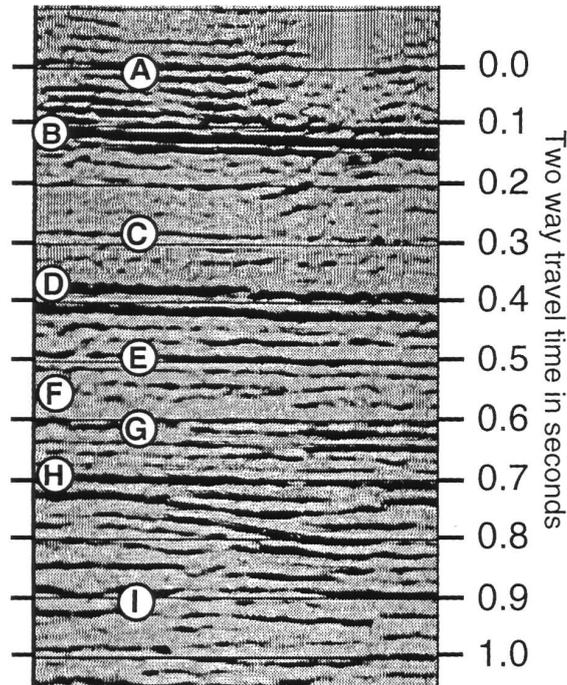


Fig. 109 : Corrélation entre les réflecteurs sismiques ligne 8, échelle verticale en secondes, temps double et la colonne stratigraphique simplifiée des couches lithologiques relevées dans le synclinal du Val de Ruz. Extrait de A. SOMMARUGA en 1997.

Le tracé des réflecteurs du profil SW88-14 de la figure 110 illustre la région du Val de Ruz du Jura neuchâtelois en passant par les anticlinaux de la Vue des Alpes et Chaumont. À côté de la colonne stratigraphique simplifiée des formations lithologiques présentes dans ce secteur, une ligne sismique, traversant cette région, est présentée avec la suite des réflecteurs. Le plus élevé stratigraphiquement des neuf réflecteurs majeurs, situé à la base du Tertiaire, est désigné par la lettre A ; la lettre B marque la base du Crétacé et les lettres

suivantes sont utilisées pour désigner la suite des réflecteurs majeurs de la série mésozoïque qui s'étend jusqu'à la lettre I situant le sommet du socle. Ces réflecteurs permettent ensuite de corréler les unités sismiques à travers la chaîne du Jura (fig. 111), donnant ainsi une excellente représentation de la continuité des lithologies et des structures à travers la chaîne du Jura tout en soulignant leurs limites.

Les profils sismiques se présentent comme d'excellents outils d'analyse pour situer et décrire la

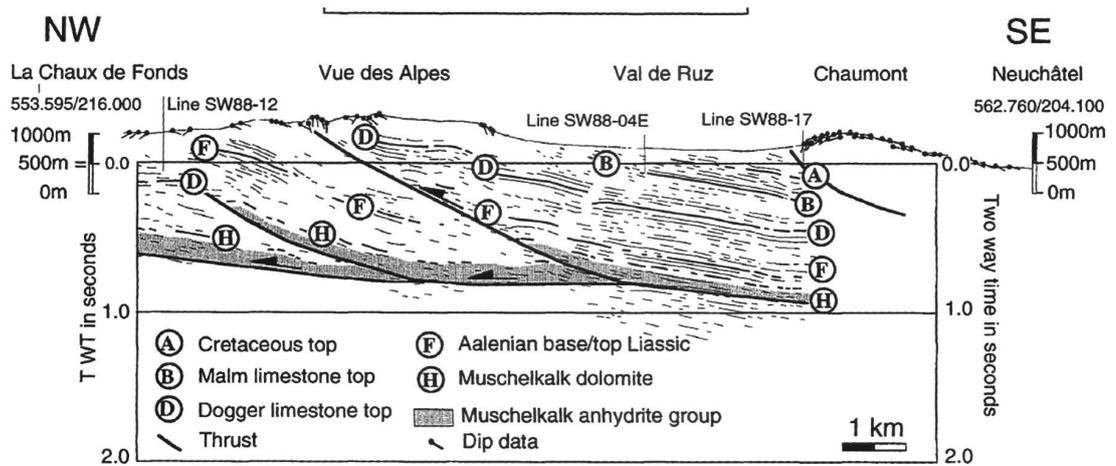


Fig. 110: Réflecteurs interprétés sur le profil sismique SW88-14 (en temps) passant à travers la région du Val de Ruz extraits de A. SOMMARUGA Et M. BURKHARD en 1997. En dessous la coupe géologique en profondeur (mètres) illustre la vraie géométrie.

répartition des évaporites, en permettant souvent d'en suivre le développement. La figure 112 présente, pour l'ensemble du Jura la puissance des couches triasiques postérieures au Buntsandstein, s'épaississant dans le centre de la chaîne. L'absence de bons repères paléontologiques conduit l'auteur à diviser les dépôts triasiques moyens et supérieurs en deux unités lithologiques (fig. 109 et 111) : en bas, l'Unité sismique triasique 2 limitée à son sommet par le réflecteur sismique H qui pourrait bien être l'expression sismique des dolomies du Muschelkalk principal ou éventuellement correspondre aux couches de la Lettenkohle ; à sa base, le réflecteur I la sépare des séries du Trias gréseux

(Buntsandstein) ou du Permo-Carbonifère ou du socle cristallin. Plus haut, l'Unité sismique triasique 1 qui représente le sommet des assises du Trias limitée par le réflecteur sismique G ; elle est formée de marnes et d'évaporites ; le réflecteur G reflète dans l'ensemble du Jura la transition entre le sommet des séries triasiques à évaporites et les calcaires à Gryphées.

L'apport innovateur de ces travaux à partir des profils sismiques, acquis par les diverses campagnes d'exploration pétrolière, est de proposer une vision moderne et complète de la structure de la chaîne du Jura et de sa transition vers le Bassin molassique situé au sud-est.

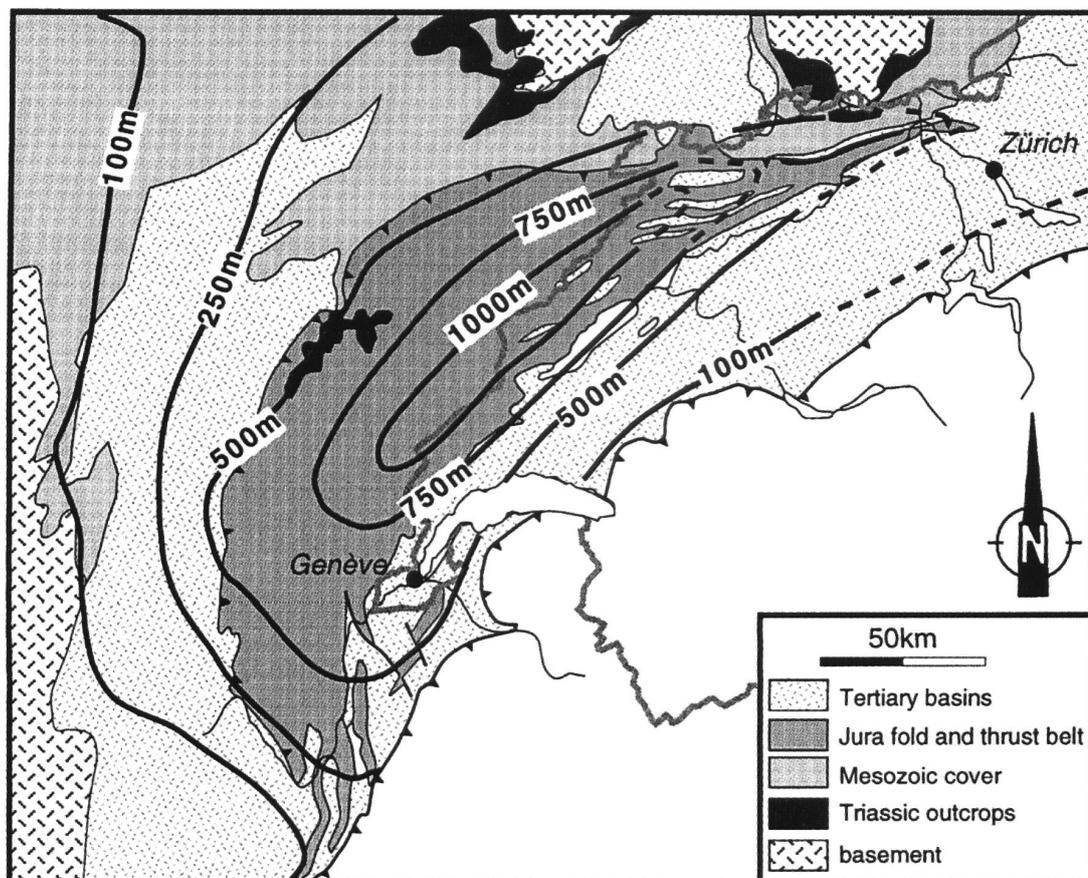


Fig. 112 : Carte des épaisseurs (isopaches en mètres) des couches du Trias (Buntsandstein non compris) de la chaîne du Jura et de ses régions avoisinantes. Modifié de A. SOMMARUGA en 1997.

9. 3. La Nagra

La Société coopérative nationale pour l'entreposage de déchets radioactifs ou *Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle* (Cédra en français, terme utilisé jusque dans les années 1990) a été créée le 4 décembre 1972 à l'initiative de l'ensemble des producteurs de déchets radioactifs en Suisse. En 1977, est inauguré le siège de l'entreprise à Baden, avec Hans Issler comme directeur. Dès 1978 est publié le rapport « *Modèle de gestion des déchets radioactifs en Suisse* » et en 1979 entre en vigueur l'Arrêté fédéral concernant la Loi sur l'énergie atomique et l'Ordonnance pour des négociations préparatoires. La Nagra dépose alors la demande pour le Laboratoire souterrain

du Grimsel dans le massif de l'Aar. Cette même année, sort la première édition de la brochure d'information en deux langues « *Cédra informe* » en français (devenue plus tard « *Nagra informe* »). En 1980, le programme d'investigations géologiques régionales démarre dans le nord de la Suisse (études sismiques, hydrogéologiques, tectoniques, forages profonds) en vue de la recherche d'un site d'implantation pour un dépôt final destiné aux déchets fortement radioactifs et par la suite à ceux faiblement et moyennement radioactifs.

La création de la Nagra va fortement dynamiser les recherches géologiques tout horizon dans les régions jurassiennes et plus particulièrement vers la terminaison est de la chaîne avec la transition au Bassin molassique, au Fossé rhénan et au Jura tabulaire.

L'apport des travaux de la Nagra à la connaissance de la géologie structurale du Jura est présenté ci-dessous. Les aspects concernant l'hydrogéologie sont développés plus loin dans Hydrogéologie, chapitre 9.2.2.

9. 3. 1. Les premières études

Des examens préliminaires de la Nagra ayant indiqué que le nord-est de la Suisse représente la zone la plus favorable pour accueillir les déchets nucléaires, des recherches géologiques intensives sont rapidement entreprises dans ce secteur. Elles font immédiatement l'objet de publications dans les «*Nagra Technische Berichte, NTB*» de cette société (les «*Rapports techniques Nagra*» pour les rares publications en français). Dans un premier rapport de synthèse, Peter Diebold (né en 1926) et W. H. Müller évaluent les risques géologiques encourus par un tel dépôt en fonction de l'évolution géologique probable de la région au cours du prochain million d'années (DIEBOLD & MÜLLER, 1985). Celui-ci s'appuie sur les connaissances anciennement acquises, complétées par les données obtenues par pas moins de treize rapports nouveaux consacrés à des disciplines modernes touchant les sciences de la Terre (mouvements récents, état des contraintes, sismicité actuelle, érosion fluviale, géologie locale et régionale, image par satellite, morphologie, sondages profonds, etc.). Les risques liés à l'évolution géologique sont examinés en fonction de deux scénarios A et B. L'hypothèse A considère que l'orogénèse alpine est terminée. Dans ce cas, un dépôt situé à 1200 m de profondeur dans le secteur envisagé par la Nagra ne serait pratiquement pas menacé par les perturbations géologiques qu'on peut attendre en fonction de celles qui sont actuellement actives. Dans le scénario B, on considère que l'évolution géologique des Alpes, de la Forêt-Noire et du Jura va se poursuivre au même rythme que celui qui a marqué le dernier million d'années; dans une telle situation, l'évolution géologique de la zone prévue pour le dépôt conduit à des conséquences plus lourdes, mais celles-ci ne paraissent pas capables d'entraîner des risques évidents pour un dépôt placé à une bonne profondeur.

En octobre 1986, une réunion spéciale des sociétés scientifiques suisses actives dans les sciences de la

Terre est organisée pour informer ces communautés des intentions et des premières recherches entreprises par la Nagra. Les premiers résultats de cette activité sont regroupés dans le volume 80/2 des «*Eclogae Geologicae Helvetiae*» où Marc Thury (né en 1944) et P. Diebold donnent une vue générale du programme visant une meilleure connaissance géologique et hydrologique de ce secteur du nord de la Suisse avec des indications sur la position des lignes sismiques réalisées et des forages profonds entrepris et proposés (fig. 113, THURY & DIEBOLD, 1987). Sur la base d'un modèle hydrodynamique régional, les équipotentielles et les directions d'écoulement au niveau du cristallin supérieur sont figurées (fig. 114, THURY & DIEBOLD, 1987, tirée de KIMMEIER *et al.*, 1985); une autre illustration présente la répartition des tremblements de terre enregistrés dans la région entre janvier 1983 et avril 1987 (fig. 115, THURY & DIEBOLD, 1987).

Le texte situe les objectifs prioritaires de la Nagra qui désire disposer d'une connaissance approfondie de la géologie de ce secteur du nord-est de la Suisse jusqu'à une profondeur de 2 km au moins, lui permettant de disposer d'une compréhension satisfaisante de l'évolution des aquifères qui marquent actuellement et ont marqué ce secteur au cours du dernier million d'années.

La Nagra reprend les résultats du Service topographique fédéral permettant de mieux situer les changements d'altitude des repères disposés sur la roche en place, grâce à la répétition des nivellements de précision durant plusieurs décennies. Les comparaisons entre les données du premier nivellement de précision de 1906 à 1930 et le second de 1949 à 1982 couvrant l'ensemble de la Suisse (Erich GUBLER, 1976) présentent les changements d'altitude comparés à un point de référence placé à Laufenburg sur le Rhin où affleurent des gneiss du socle de la Forêt-Noire. Elles font apparaître une subsidence le long de la bordure interne du Jura avec des valeurs particulièrement prononcées au niveau du lac Léman. Une autre zone de faible subsidence, cette fois-ci, longe le cours du Rhin en amont du point de référence et s'étend jusque dans la région de Schaffhouse. L'absence de données à l'intérieur du Jura est flagrante. L'itinéraire Olten-Bâle, la seule traversée de la chaîne, est également marqué

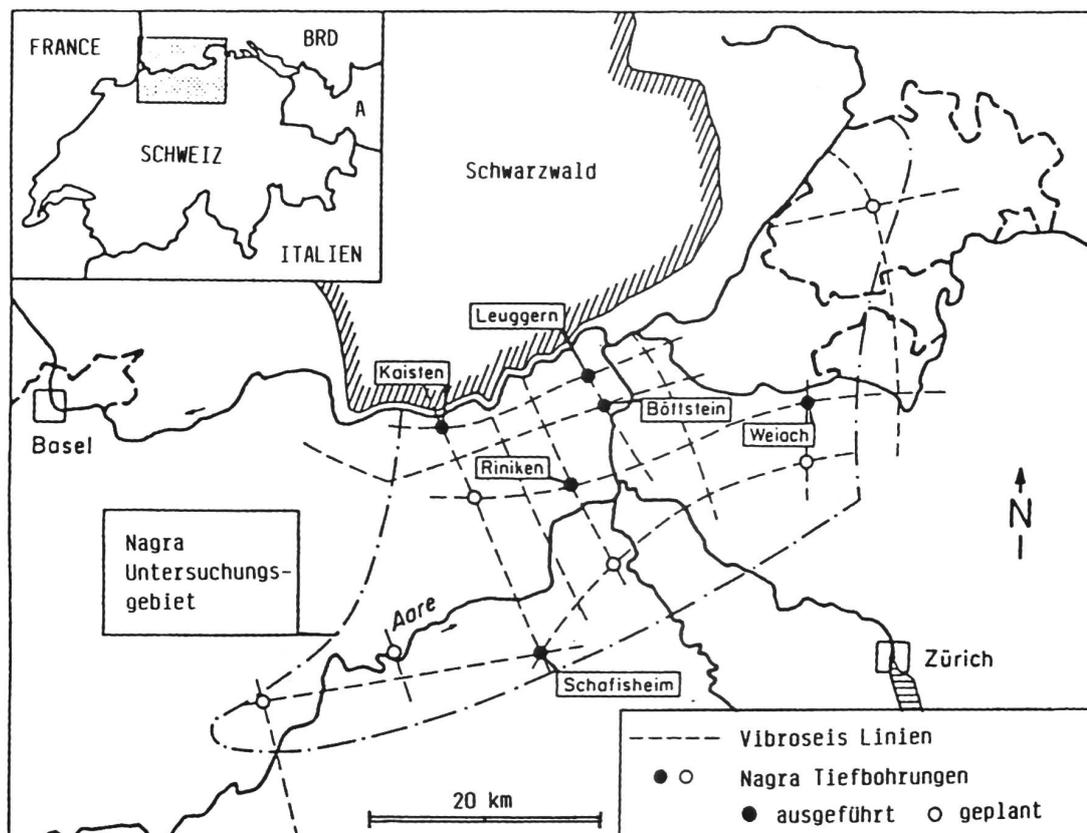


Fig. 113 : Lignes sismiques et forages profonds entrepris dans le nord de la Suisse. Extrait de M. THURY & P. DIEBOLD en 1987.

par une légère subsidence au passage du col du Hauenstein; celle-ci pourrait résulter de l'utilisation de jalons en bois le long du premier nivellement, des instruments qui, par la suite furent remplacés par des mires de référence avec fils en invar².

La carte géologique spéciale au 1:100 000, n° 121 (ISLER *et al.*, 1984) est une contribution importante des « *Technische Berichte* ». Elle est publiée par la Commission géologique suisse et la Nagra. Ce document est accompagné d'une

très importante notice explicative, signée par W. H. MÜLLER *et al.* (1984) qui, par sa présentation scientifique didactique exemplaire richement illustrée, offre une présentation claire de l'ensemble des problèmes géologiques régionaux et locaux devant servir de base aux travaux de la Nagra pour conduire ses recherches et proposer des sites destinés à accueillir les déchets nucléaires en profondeur. Cette importante contribution comporte une analyse des nombreux travaux géologiques, anciens et modernes entrepris dans ce secteur, et se trouve complétée par l'inventaire des 33 cartes géologiques officielles publiées touchant ce secteur. À ces documents s'ajoutent la liste des 223 cartes géologiques et croquis cartographiques publiés dans des travaux scientifiques dont des thèses, ainsi que 57 documents de cartographie géologique originaux non publiés.

² L'Invar est un alliage de fer (64%) et de nickel (36%) dont la propriété principale est d'avoir un coefficient de dilatation très faible. Cette invention est due au Suisse Charles Édouard Guillaume, qui fut récompensé du prix Nobel de physique en 1920 pour l'étude des propriétés de cet alliage. (Wikipédia)

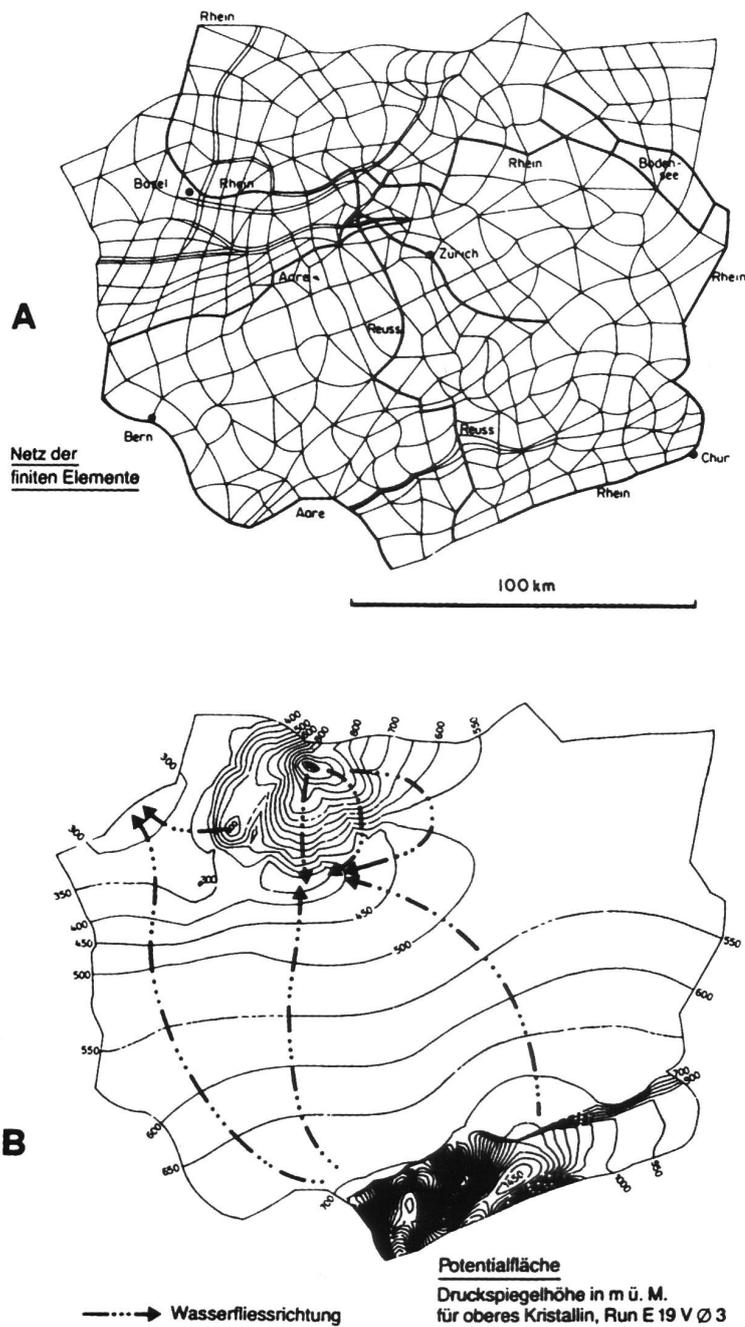


Fig. 114 : Équipotentiels et directions d'écoulement au niveau du cristallin supérieur. Extrait de M. THURY Et P. DIEBOLD en 1987, tiré de KIMMEIER *et al.* (1985).

Modèle hydrodynamique régional.

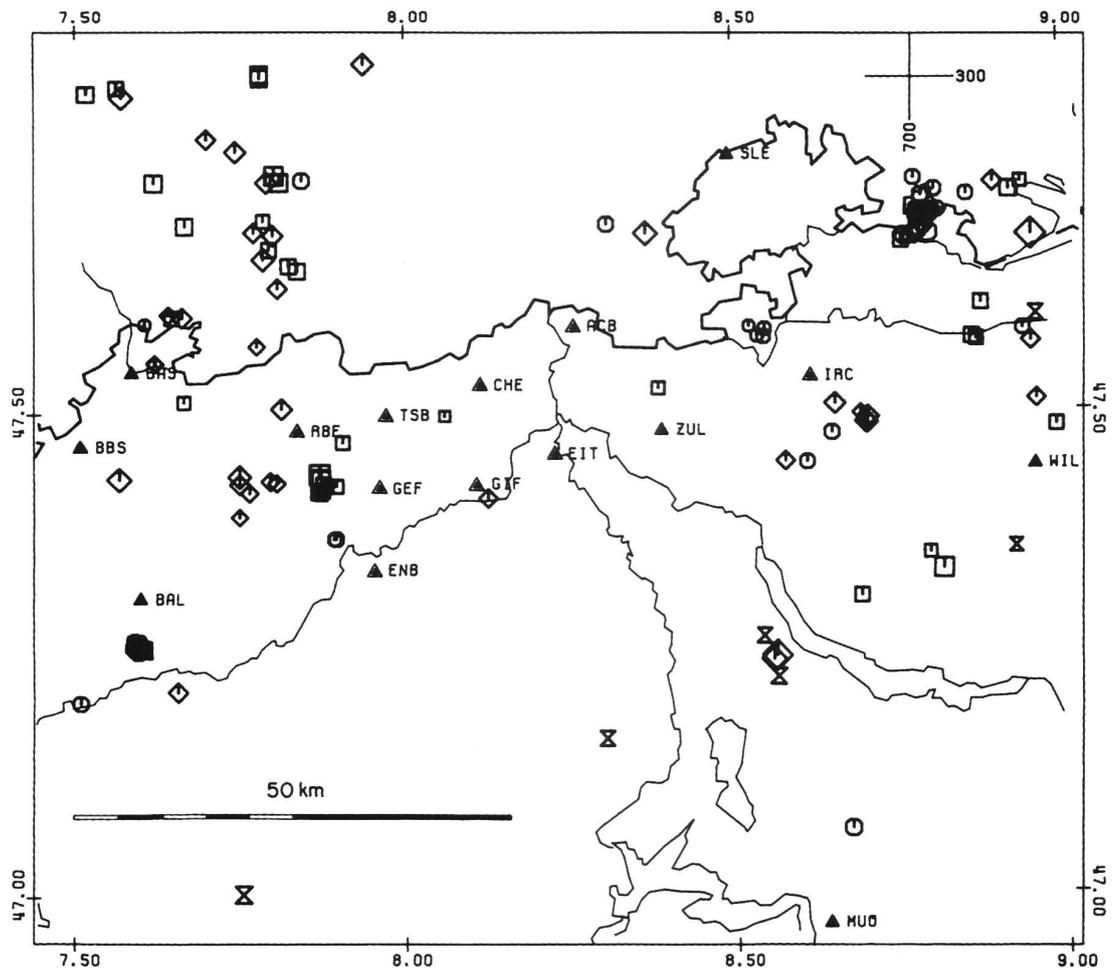
A : réseau d'éléments finis pour le cristallin.

B : équipotentiels simulés et directions d'écoulement pour le cristallin supérieur.

Netz der finiten Elemente = réseau d'éléments finis ;

Wasserfliessrichtung = direction d'écoulement ;

Potentialfläche ; *Druckspiegelhöhe in m ü. M. für oberes Kristallin, Run E 19 V Ø 3* = équipotentiels ;
potentiel hydraulique en m s.m. pour le cristallin supérieur, variante E 19 V Ø 3.



ERDBEBEN - EPIZENTREN

Jan. 1983 - April 1987

▲ Nationale Seismographenstation

▲ Nagra Seismographenstation

$M_L \backslash Z$	≥ 0	≥ 6	≥ 13	≥ 25
≥ 1	○	□	◇	⊗
≥ 2	⊙	⊠	⊡	⊗
≥ 3	⊕	⊡	⊣	⊗
≥ 4	⊗	⊡	⊣	⊗
≥ 5	⊗	⊡	⊣	⊗

Fig. 6. Mikroerdbeben-Messnetz und Epizentren (Januar 1983 bis April 1987).

Fig. 115 : Répartition des tremblements de terre enregistrés dans le secteur nord-est de la Suisse entre janvier 1983 et avril 1987. Extrait de M. THURY Et P. DIEBOLD en 1987.

9. 3. 2. Les tremblements de terre

Les données faisant état des tremblements de terre enregistrés en Suisse montrent que la région du Jura est caractérisée par une faible activité sismique comme le situe l'inventaire établi par Dieter Mayer-Rosa (né en 1936) *et al.* en 1983, où est reportée la localisation des épicentres des tremblements de terre enregistrés entre 1973 et 1982 avec des magnitudes égales ou supérieures à 1,8 sur l'échelle Richter. La région de Bâle s'y distingue nettement par l'importance de son activité. Une autre zone plus diffuse est située dans la région neuchâteloise; elle est très certainement liée à la présence de l'Observatoire de sismologie de Neuchâtel et le vide relatif d'événements dans les zones voisines comme celles du Jura français, certainement lié à l'absence de moyens comparables à ceux dont dispose la région neuchâteloise. Pour être moins sensibles à de telles situations et pour disposer de données représentatives des événements sismiques de faible intensité, plusieurs stations d'enregistrement ont été mises en service. Ces développements ont également conduit à montrer que les événements affectant le Jura résultaient de tremblements de terre pouvant s'étendre jusqu'à de grandes profondeurs, recoupant ainsi la croûte entière (N. DEICHMANN & K. RENGGLI, 1984). Ce travail fait état de l'installation d'un réseau sismologique complémentaire établi par le Service suisse de sismologie (*Schweizer Erdbebendienst-SED*) permettant l'enregistrement de l'activité sismique de faible intensité de cette région. Les observations relevées entre janvier 1983 et septembre 1984 restent dominées par celles du bord sud-est du Fossé rhénan et par celles provenant de la partie nord du Jura.

L'analyse des enregistrements des tremblements de terre provenant du nord-est de la Suisse permet à N. PAVONI (1984) de montrer que ces événements présentent globalement une bonne corrélation entre les mécanismes au foyer enregistrés actuellement et les effets de la néotectonique ayant affecté ce secteur. La profondeur des hypocentres des événements actuels est souvent assez considérable, se situant entre 10 et 25 km, indiquant aussi que les failles associées se prolongent jusque dans le socle cristallin. L'orientation des mécanismes au foyer indique un raccourcissement régional horizontal orienté NNW couplé avec une extension

horizontale WSW. L'étude des structures régionales indique que la déformation actuelle, marquée par des plis et des charriages accompagnés de failles décrochantes, n'a pas changé d'orientation au cours des derniers 5 à 8 millions d'années. Une carte structurale régionale (PAVONI, 1984) allant du bord alpin à la Forêt-Noire et du Jura central au lac de Constance illustre les données de la résolution des mécanismes au foyer provenant de tremblements de terre récents enregistrés, en indiquant l'orientation des axes de compression et d'extension (voir aussi Monika GISLER *et al.*, 2008).

9. 3. 3. Les six forages profonds du Jura oriental

Après la publication des premiers résultats sur les structures du nord-est de la Suisse, la Nagra publie dans sa série des *Technische Berichte (NTB)* des rapports scientifiques détaillés qui font état des analyses conduites sur les matériaux provenant des six forages profonds effectués dans le secteur de la bordure du Jura oriental où elle a procédé à l'établissement d'un réseau de nouvelles lignes sismiques (fig. 113, THURY & DIEBOLD, 1987). L'intensité des investigations de la Nagra et le sérieux de sa recherche contribuent à une approche détaillée et moderne de la structure profonde du Jura oriental, dont celles de la tectonique, de son socle et de son hydrogéologie; ces travaux conduisent également à l'amélioration des connaissances de certaines lithologies comme celles du Keuper et du Muschelkalk, qui jusqu'alors restaient fragmentaires du fait de la mauvaise qualité des affleurements naturels; ces différentes recherches situent l'importance de la porosité de certaines lithologies (Molasse tertiaire, Malm, Muschelkalk, Buntsandstein et même le socle cristallin); elles mettent en évidence la présence d'aquifères superposés dont les écoulements régionaux sont alimentés parfois par des apports lointains.

L'un de ces six forages, Schafisheim (situation, fig. 113), est situé au sud du Jura plissé au début du Bassin molassique. Les autres sont situés dans le Jura tabulaire, la couverture mésozoïque autochtone du Jura; le plus méridional de ceux-ci, Riniken, est proche du front du Jura plissé et

chevauché; Kaisten et Leuggern sont placés au sud de la retombée du massif de la Forêt-Noire, à faible distance du cours du Rhin; Böttstein et surtout Weiach assurent les connaissances en direction de l'est. Ces forages permettent une analyse des différentes lithologies rencontrées dans la couverture sédimentaire qui sont complétées par les données établies sur le socle hercynien où une épaisse série sédimentaire permo-carbonifère discordante est reconnue dans un étroit mais profond graben d'orientation ouest-est. Les échantillons prélevés dans ces six forages profonds font l'objet d'analyses, avec une attention soutenue accordée aux problèmes de la perméabilité, de l'altération et des échanges chimiques qui ont affecté ces différentes roches au cours des temps géologiques. Afin de saisir au mieux les circulations anciennes et récentes qui se sont produites dans ces ensembles rocheux, un regard attentif est accordé aux problèmes de la porosité et de la perméabilité afin d'identifier tant les effets des actions anciennes (orogénèse hercynienne) que celles qui ont pu se produire en relation avec le plissement du Jura, et de celles qui sont actuellement actives. Dans toute cette approche, la majorité des données proviennent de secteurs situés sur la bordure de la chaîne du Jura, permettant ainsi de situer le cadre général dans lequel se trouve cette zone, avec l'espoir d'y reconnaître les effets de déformations tardives qui peut-être n'auraient pas effacé toutes les traces des évolutions antérieures.

Dans ces zones complexes du nord de la Suisse à l'est de Bâle, où se situent le Fossé rhénan, la Forêt-Noire, le Jura tabulaire et le Jura plissé, A. BECKER *et al.* (1984) présentent des données du champ des contraintes actuellement observé par l'analyse de sur-forage (*doorstopper technique*) et des fissures de tension relevées sur les parois des forages profonds. Ces résultats sont eux-mêmes comparés aux données provenant de l'analyse des tremblements de terre (« solution de mécanismes au foyer » ou *fault plane solution*). Les résultats obtenus par ces différentes techniques montrent une assez grande hétérogénéité de l'orientation des contraintes. Alors que les analyses provenant du cristallin de l'Europe centrale présentent régulièrement une direction de contrainte compressive orientée (N140° +/- 10°), cette direction n'a été retrouvée qu'une seule fois en Suisse dans les

couches superficielles; les autres mesures montrent des déviations pouvant aller jusqu'à 80° par rapport à cette direction de référence. Cette dernière est cependant présente au niveau du socle placé sous la couverture du Jura. Ainsi, pour la première fois, une rotation de la direction des contraintes est observée entre les contraintes présentes dans la couverture charriée et celles mesurées dans le socle sur lequel la couverture a été charriée. Dans les sédiments du graben permo-carbonifère, la contrainte principale compressive prend une orientation N160° +/- 10°.

L'analyse du forage de Böttstein (T. PETERS *et al.* 1986a et b) décrit et commente les observations effectuées sur les carottes de ce premier forage implanté dans le Jura tabulaire à quelque 10 km au nord de la localité de Brugg, dans le secteur où l'Aar coule au nord avant de rejoindre le Rhin. Après avoir traversé 17,5 m de quaternaire, le forage rencontre les séries du Keuper sur un peu moins de 105 m d'épaisseur. Les couches du Trias sont forées sur 300 m et elles surmontent un granite qui se poursuit jusqu'à une profondeur de 1501 m où le forage a été arrêté. Les données obtenues à cette occasion ainsi que celles provenant des autres forages profonds montrent que les séries de la couverture mésozoïque de la région se sont déposées dans un milieu structural stable conduisant à la formation d'une suite de couches étendues ne présentant aucune variation importante de puissance ou de faciès; ces données confirment celles des travaux anciens et permettent d'apporter enfin des informations fiables sur la succession et la puissance des différents niveaux du Keuper, qui restaient souvent incertaines du fait des observations recueillies dans des zones très affectées par la mauvaise qualité des affleurements. De plus, les échantillons de ce forage permettent d'apprécier la qualité de ces roches dans leur milieu. Ainsi dans les successions du Muschelkalk supérieur, à une profondeur entre 122 m et 150 m où le forage traverse les dolomies à *Trigonodus*, la porosité mesurée de ces roches atteint souvent des valeurs supérieures à 20%; cette situation est nettement influencée par la dissolution sélective des coquilles calcaires de ces assises qui renferment l'aquifère du Muschelkalk supérieur.

Dans le Muschelkalk moyen, au niveau du groupe sulfaté supérieur, entre 244,10 m et 252,73 m

de profondeur, ce forage a recoupé des niveaux de sel (halite) à gros cristaux translucides dans lequel baignent des morceaux anguleux (2 cm) de nature argileuse. Au sommet de ces assises de sel se situe une zone de brèche de près de 8 m de puissance où l'anhydrite est présente sous la forme de fragments qu'accompagnent d'autres fragments de marnes dolomitiques laminées. La base de cet ensemble bréchiq ue présente une allure finement schisteuse et laminée pouvant être rapportée à une zone de cisaillement, une solution qui n'est pourtant pas envisagée par les auteurs. La série sédimentaire mésozoïque débute par les assises du Buntsandstein (grès bigarrés) relativement peu épais, marqué par une porosité assez importante, située entre 5,9 et 13,3 %, dont une partie pourrait résulter de la dissolution du ciment de ces roches ou de celle des feldspaths altérés.

La publication d'Albert Matter (né en 1936) en 1988 fait état des données récoltées lors du forage de reconnaissance de Schafisheim situé sur la bordure du Bassin molassique, dans le prolongement de l'anticlinal du Born, à 5 km au sud de la bordure du Jura plissé (MATTER *et al.*, 1988a). À cette occasion, les auteurs soulignent que l'analyse de ce forage permet d'y reconnaître des niveaux de sel (NaCl) ainsi que de l'anhydrite du Trias. Ces observations s'ajoutent aux travaux de W. H. MÜLLER et ses co-auteurs, qui avait précédemment en 1978 et en 1984 étudié la rhéologie de l'anhydrite dans des expériences et avait observé une chute importante dans la résistance à la déformation à haute température due au maclage, au glissement intracristallin et à la recristallisation dynamique par migration des limites de grains. Les cisaillements observés dans le forage de Schafisheim attestent donc d'importantes déformations dans le sel et les sulfates associés, confortant l'hypothèse du Fernschub de A. Buxtorf.

À la suite des campagnes de forages et des travaux de W. H. Müller, des recherches plus spécifiques sur la déformation dans les niveaux évaporitiques ont été entreprises à l'Université de Bâle (JORDAN & NÜESCH, 1989a et b; JORDAN, 1992, 1994). Ces études démontrent non seulement l'existence d'une, voire plusieurs zones de déformation, correspondant au décollement basal mais aussi la répartition et les mécanismes de la déformation intracristalline. Ainsi à côté des niveaux où l'on

observe une importante déformation plastique à faible température jouxtent des niveaux où les structures sédimentaires sont intactes.

9. 3. 4. D'autres rapports techniques (*Nagra Technische Berichte, NTB*) sur le sujet

Dans son désir d'utiliser toutes les ressources disponibles de la géophysique qui pourraient apporter des compléments à la connaissance des structures géologiques du nord-est de la Suisse, la Nagra s'engage parfois dans des voies nouvelles qui se révèlent mal adaptées aux problèmes posés; elle ne renonce cependant pas à publier ces tentatives. Ainsi, le travail de Emile KLINGELÉ (né en 1939) et Heinrich SCHWENDENER (1952-2014) en 1984 sur la possibilité de préciser la structure du toit du socle dans le nord-est de la Suisse par des mesures aéromagnétiques et magnétiques au sol, de même que celui de Gaston Fischer (1929-2014) et ses collaborateurs en 1984 font état de ces tentatives infructueuses.

Les mesures de réfraction sismique demandées par la Commission suisse de géophysique dans le but de préciser la géométrie du graben permo-carbonifère du nord-est de la Suisse, sont présentées par G. FROMM *et al.* (1985). Grâce à la bonne qualité des résultats, les grandes lignes et la profondeur de cette structure majeure, d'orientation WSW-ENE, du nord-est de la Suisse sont précisées. On remarquera surtout la présence de deux horizons repères: l'un est attribué à des niveaux du Carbonifère le plus profond mais sans qu'il soit possible de l'identifier avec certitude dans le secteur ouest, le second est attribué à la limite supérieure du cristallin reconnu dans le sondage de Weiach. On a également pu donner une profondeur de plus de 3300 m au bassin dans sa partie WSW, alors que celle-ci s'élève à moins de 3000 m plus à l'ENE.

Enfin, pour se faire une idée du socle hercynien qui se trouve caché sous la couverture mésozoïque du Jura tabulaire, Martin HUBER et Adriana HUBER-ALEFFI (1984) présentent une analyse des structures et des roches du cristallin de la Forêt-Noire. Les données principalement étudiées sont: a) les discontinuités structurales de ce socle, b) les déformations cassantes et ductiles et éventuellement

leur chronologie, c) la grandeur et la géométrie des principales unités géologiques, d) l'identification des roches cristallines devant permettre des comparaisons avec les roches provenant des forages. Une attention toute particulière est donnée à la fracturation des roches et aux diaclases.

9. 3. 5. Les recherches plus récentes de la Nagra

Depuis les travaux pionniers de la Nagra dans le Jura du nord-est de la Suisse, de nombreuses nouvelles études approfondies, comme des campagnes sismiques régionales complémentaires en 2D (1991-1992, 2011-2012) ou en 3D (1997, 2015-2016) ont été réalisées et ont permis d'affiner la compréhension du développement structural de cette région du Jura. Les avancées majeures sont décrites dans le rapport final de l'étape 2 du plan sectoriel des dépôts géologiques profonds avec la caractérisation des sites potentiels (Nagra, 2014). Les toutes dernières campagnes sismiques 3D haute résolution dans les régions de Jura Ost (Jura est), Nördlich Lägern (Nord des Lägern) et de Zürich Nord-Ost (Zurich nord-est) (Nagra, 2019 a, b, c)³, ainsi que des récents forages ont permis d'apporter un nouvel éclairage, largement insoupçonné, de la géologie structurale de cette partie du Jura.

L'analyse de la fracturation selon l'étude de H. Madritsch en 2015 se fait de manière régionale et bénéficie des outils modernes de l'analyse des paléocontraintes. Dans une autre publication, (MADRITSCH *et al.*, 2018) cet auteur relève l'importance de l'architecture et de la cinématique du fossé permo-carbonifère hérité du nord de la Suisse (nommé fossé Constance-Frick) et révèle à partir des récentes études sismiques la structure interne complexe en demi-graben (fig. 116). Dans

son travail de recherche basé sur les profils de la Nagra en 2016, Alexander MALZ et ses collègues présentent une structure triangulaire inhabituelle, formée au front de l'anticlinal des Lägern, terminaison orientale du Jura. Cette structure en « *fish-tail* » s'explique par des niveaux de décollement secondaire est par la réactivation de failles normales héritées. Des études de modélisation, de mécanique des roches et de coupes tectoniques équilibrées sont entreprises. L'analyse des veines et l'avancée dans la technique de datations des veines, surtout sur la calcite, apportent par ailleurs de nouvelles données quant aux fluides impliqués et aux âges des différentes déformations (MAZUREK *et al.*, 2018).

Ainsi l'engagement et le besoin de la Nagra pour comprendre les processus géologiques qui s'opèrent dans le sous-sol du Jura du nord-est de la Suisse, ont stimulé de nombreuses recherches dans toute la chaîne du Jura et ses régions limitrophes. Depuis les années 2000, et en quelque sorte malgré les nombreux travaux déjà existants, l'étude de la tectonique du Jura vit un vrai rajeunissement. Dans le débat sur l'énergie, la gestion des déchets nucléaires est devenue un sujet important. Beaucoup doutent qu'elle puisse être résolue. Dans ce contexte, Jörg HADERMANN en 2014 et ses deux co-auteurs racontent dans leur texte comment les différents acteurs de l'industrie, de la science et des autorités de l'énergie ont vécu leur travail, qui a finalement abouti à la démonstration de la possibilité d'élimination des déchets nucléaires. Ils montrent comment les déchets radioactifs ont été traités en Suisse, comment la population et les politiciens ont réagi et quelles étaient les exigences officielles. Ils indiquent également les principaux domaines de recherche et de développement et montrent comment les idées scientifiques et les approches des solutions ont évolué au fil du temps.

³ Tous ces rapports sont désormais publics et sont disponibles en pdf gratuitement sur le site www.nagra.ch afin que la transparence soit garantie.

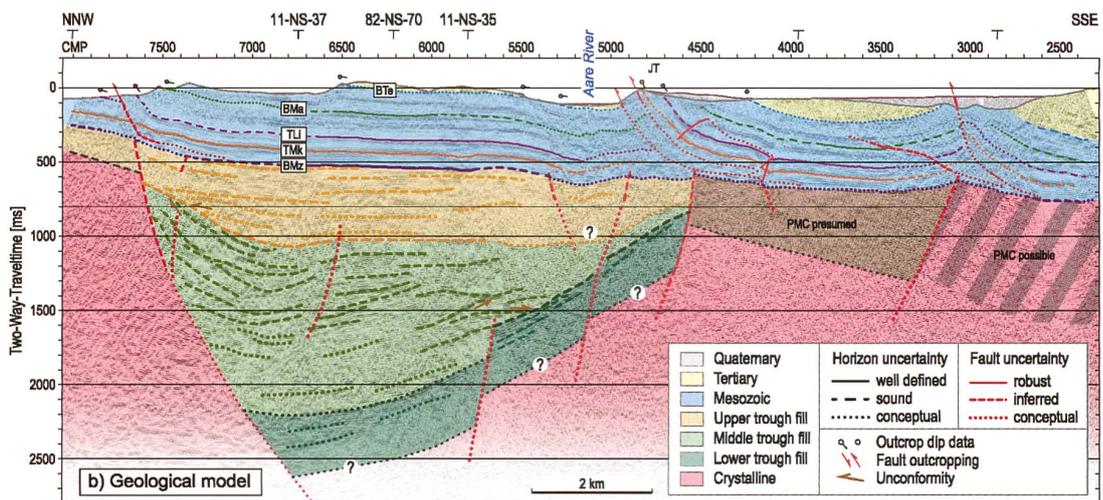
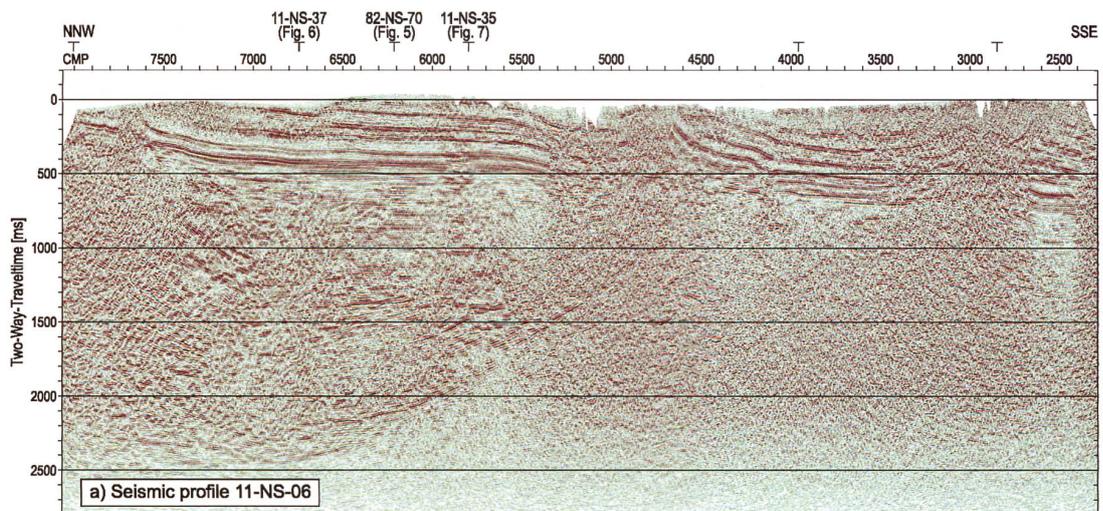


Fig. 116 : Présentation basée sur un profil sismique de la structure du fossé permocarbonifère situé au nord-est de la Suisse. Extrait de MADRITSCH *et al.* en 2018.

