



Horace-Bénédict de Saussure, pionnier en 1784 du concept de "refoulements horizontaux en sens contraires" en géologie structurale

Albert V. Carozzi

► To cite this version:

Albert V. Carozzi. Horace-Bénédict de Saussure, pionnier en 1784 du concept de "refoulements horizontaux en sens contraires" en géologie structurale. Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie, 1997, 3ème série (tome 11), pp.89-112. hal-00932544

HAL Id: hal-00932544

<https://hal.science/hal-00932544>

Submitted on 17 Jan 2014

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

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

TRAVAUX
DU
COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE
- Troisième série -
T.XI (1997)

Albert V. CAROZZI
Horace-Bénédict de Saussure, pionnier en 1784 du concept de "refoulements
horizontaux en sens contraires" en géologie structurale

COMITÉ FRANÇAIS D'HISTOIRE DE LA GÉOLOGIE (COFRHIGEO) (séance du 5 mars 1997)

Résumé

L'analyse chronologique détaillée de la démarche scientifique de Saussure pendant sa tentative de synthèse structurale des Alpes montre une succession d'hypothèses, de sophistication croissante, qui le conduisent finalement au concept de la formation des Alpes par des "refoulements horizontaux en sens contraires", base de la tectonique tangentielle moderne.

Abstract

The detailed chronological analysis of the scientific trajectory of de Saussure during his attempt at a structural synthesis of the Alps, shows a succession of hypotheses, of increasing sophistication, which led him finally to the concept of formation of the Alps by horizontal antagonistic thrusts (*refoulements horizontaux en sens contraires*), the basis of modern tangential tectonics.

Introduction

Cette présentation est l'analyse du processus mental d'un géologue éclairé et cultivé du dix-huitième siècle en face d'un problème fondamental dans le contexte de ses connaissances, ses conditions de travail sur le terrain, sa logique d'interprétation des faits d'observation, et sa capacité de synthèse scientifique.

Les manuscrits inédits de Saussure conservés à la Bibliothèque publique et universitaire de Genève et ses *Voyages dans les Alpes...* (première édition, 1779-1796, 4 volumes in-4°) sont les sources primaires de cette analyse.

Les références aux manuscrits des Archives Saussure sont données comme suit : numéro du Ms, date, carnet, ou carnet divisé en cahiers (exemple: cahier 3 du carnet 2 : 3/2), numéro du folio. Quand le manuscrit n'est pas paginé, la date de la citation remplace le folio. Les références aux *Voyages dans les Alpes...* sont données comme suit : VA, volumes I à IV, date, numéro du paragraphe §. Il est d'usage de ne pas utiliser la pagination en raison des diverses éditions.

Le bagage scientifique initial

De Saussure était au courant des idées dites neptunistes de l'époque, issues de Saxe ou du Bassin de Paris, à savoir que les granites étaient considérés comme des dépôts primitifs de divers minéraux précipités chimiquement et cristallisés au fond de l'océan universel encore chaud en voie d'abaissement. Ils sont recouverts par d'autres dépôts successifs d'origine aqueuse où les processus chimiques et mécaniques s'associent, tels que les gneiss, les schistes micacés primitifs, les roches de "transition", et finalement les calcaires, grès et schistes secondaires fossilifères, et enfin les roches tertiaires alluviales. L'hypothèse neptuniste ne comporte aucun concept dynamique de déformation ou de plissement, les quelques inclinaisons locales modérées résultent d'affaissements.

De Saussure, sa formation, sa méthodologie et ses écrits

Une formation solide pour l'époque caractérise de Saussure. Elle comprend la physique, la chimie, l'histoire naturelle (surtout la botanique), les études des auteurs classiques grecs et latins, la philosophie, la logique et la métaphysique. Il associe ces bases avec une organisation remarquable des buts de recherche et d'expérimentation, la préparation pour chaque voyage d'un agenda (Fig. 1) ou liste détaillée de sujets à étudier et d'observations à effectuer (pour éviter le plus possible d'être accaparé par certains aspects au détriment d'autres et pour combattre les effets de la fatigue et autres circonstances physiques diminuant les facultés d'observation du voyageur), une grande acuité sur le terrain qui conduit à des observations qui serviront de modèles pour ses successeurs, une logique rigide d'analyse des données par hypothèses simples ou multiples.

Il pratique cette méthode scientifique d'une manière extrêmement objective avec un minimum d'idées préconçues. Il est d'une honnêteté scientifique incroyable, autant dans ses manuscrits que dans ses textes imprimés, il avoue franchement ses doutes, il comprend ses limites, il est modeste, scrupuleux vis-à-vis des opinions des autres, il est généreux dans ses rares critiques, et il est certainement convaincu de ne pas avoir le monopole exclusif de la vérité.

Dans ses écrits de Saussure utilise un langage clair, vivant, précis pour décrire les phénomènes géologiques autant que les expériences de laboratoire, les propriétés des roches et des échantillons ramassés en cours de route autant que les aspects sociaux, culturels et folkloriques des régions qu'il traverse. Il possède l'art d'entraîner et d'émouvoir le lecteur par la sincérité et la candeur de ses récits sans utiliser d'effets de style.

Les techniques de terrain

De Saussure va effectuer l'exploration des Alpes pratiquement sans l'aide de documents scientifiques antérieurs fiables, la plupart étant des récits de voyages folkloriques dans les montagnes maudites et leurs glaciers. Parmi les autres contraintes de terrain à cette époque sont les difficultés d'accès qui limitent essentiellement ses itinéraires aux cols principaux et aux sommets accessibles qui les entourent (Fig. 2). Ainsi, il traverse la chaîne des Alpes quatorze fois par huit passages différents et fait en outre seize excursions jusqu'au centre de la chaîne. Les ascensions ponctuelles plus difficiles, avec des guides comme celle au mont Blanc, sont rares et surtout dédiées aux observations de physique atmosphérique.

Voyage autour du Mont Blanc

en 1774 10^e Jul.

Brouillard en crayon N.º 1.

Extrait de l'Agenda

<u>Vallées</u>	<u>Montagnes secondaires</u>	<u>Montagnes primitives</u>
1. Leur direction générale, transversale ou parallèle à la Chaîne des Alpes.	1. Grandeur, hauteur, situation, forme, direction	1. 2. 3. comme p. secondaires.
2. La longueur & largeur & forme de la section horizontale.	2. Liaison en chaînes ou isolées, etc.	4. Direction d'un Oran du Mont. à l'autre & si subit ou gradué, etc. etc.
3. Angles correspondants.	3. Inclinaison des flancs; sont-ils plus rapides au midi & au couchant.	5. Fentes, & leur situation & ordre.
4. Vallées correspondantes.	4. Incl. des Couches.	6. Forme des Liures, si exactes, si de même nature, etc.
5. Montagnes correspondantes.	5. Relativ. aux gr. li. latérales.	7. Vallées.
6. Cercles d'après en part ou barrés aux entrées.	6. Relat. aux Vallées adjacentes.	8. Causes de ces fentes.
7. Inclinaison du fond.	7. Relat. aux Montagnes voisines.	9. Horn schiefer.
8. Nature de ce fond.	8. Épaisseur de ces Couches.	10. & forme & étendue de la feuille.
9. Tronçons de monts voisins ou venus de loin, angulaires ou arrondis si plus gros au haut de la Vallée.	9. & dans le même Mont. à diff. hauteurs.	11. leur épaisseur comparée, etc.
10. Nature du lit supérieur & de la base solide.	10. & dans différentes Montagnes voisines.	12. leur cause, dans la forme du M. ou dans d'autres, successif.
	11. Intention de les & leur causes.	13. de l'usure à diverses hauteurs.
	12. Fentes, leur direction, etc.	14. si l'usure est glaciaire ou autre, ou si tout est contemporain.
	13. leur Nature, spécifiques.	15. Gravel. & leur position, intégrants.
	14. & si elle est la même dans toutes les hauteurs de la même montagne ou différente en divers. etc.	16. si l'un est sensible à leur étendue.
	15. si elle est la même dans Montagnes voisines.	17. si plus dur en longueur ou haut.
	16. Transition d'un genre à l'autre.	18. si insin par eau & par air.
	17. forme naturelle du fragment.	19. si l'un est parasite.
	18. Corps étrangers, & de quelle nature primitive ou actuelle.	20. si l'un est glaciaire.
	19. & dans quelle situation.	21. si l'un est igné.
	20. si différents en diff. lieux de la même Mont. ou de voisines.	22. Porphyre, Laves, etc. etc.
	21. si l'un d'eux contient un fragment de primitif.	23. Corps étrangers, M. ou de li fragments de secondaires.
	22. M. de M. ou de li. Chab. etc.	24. Cavernes & forme, p. ou de passage, & cause.
		25. Blocs amoncelés aux somm.

Fig. 1 - Mise au net de l'Extrait de l'Agenda du Voyage autour du Mont-Blanc en 1774 avec liste d'observations à faire concernant les vallées, les montagnes secondaires et primitives (Ms 14, 1774, 1/1,1).

Cette répétition des mêmes itinéraires est un trait typique de sa technique systématique d'exploration qui touche de près celle de l'Agenda : revoir de multiples fois le même objet en fonction de l'évolution de sa pensée scientifique et d'une expérience toujours croissante.

Il a gardé toute sa vie la discipline astreignante de mettre au net ses notes de terrain à l'encre tous les soirs ou dans les 24 heures afin de ne rien perdre de la fraîcheur des observations. Cette tâche a été rendue encore plus difficile par la fatigue des voyages et sa santé souvent précaire. Une comparaison entre les notes prises sur le terrain au crayon et la mise au net définitive à l'encre montre un rapport souvent de 1 à 3 indiquant l'usage extensif d'une mémoire visuelle extraordinaire et la nécessité qu'il ressentait de la préserver au plus vite de manière définitive.

De Saussure face aux Alpes

Toute la vie de Saussure a été dédiée à la compréhension de la structure des Alpes, tâche surhumaine car il se trouvait en présence d'un édifice structural d'une complexité extraordinaire, probablement le cas le plus extrême possible de géologie régionale par rapport au concept simpliste de couches horizontales du dogme neptuniste. Mais son effort surhumain n'a pas été vain car il a introduit des innovations capitales qui ont conduit à la compréhension moderne de la structure des Alpes (Carozzi, 1987, 1989, 1992).

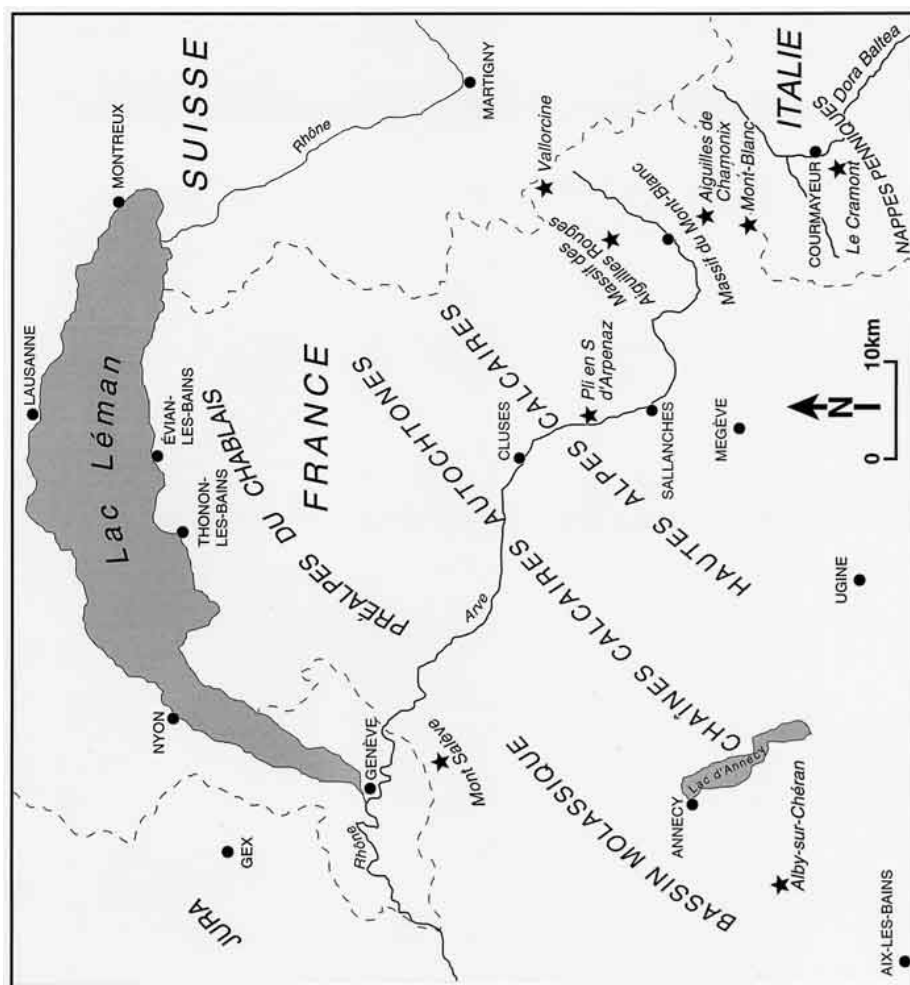


Fig. 2 - Carte géographique simplifiée indiquant les principaux sites étudiés par de Saussure.

L'itinéraire géologique répété de nombreuses fois par de Saussure, entre Genève et Chamonix, sur quelque cinquante kilomètres seulement, s'étend du pli couché et faille du Salève, suivi des plis couchés disharmoniques et spectaculaires des Hautes Alpes calcaires (nappe de Mordes), aux granites du massif du Mont-Blanc intrusifs dans les roches métamorphiques redressées par l'orogénèse hercynienne et montrant des réseaux de fractures subverticales ou en éventail, mis en évidence par les agents atmosphériques de haute altitude (Fig. 3).

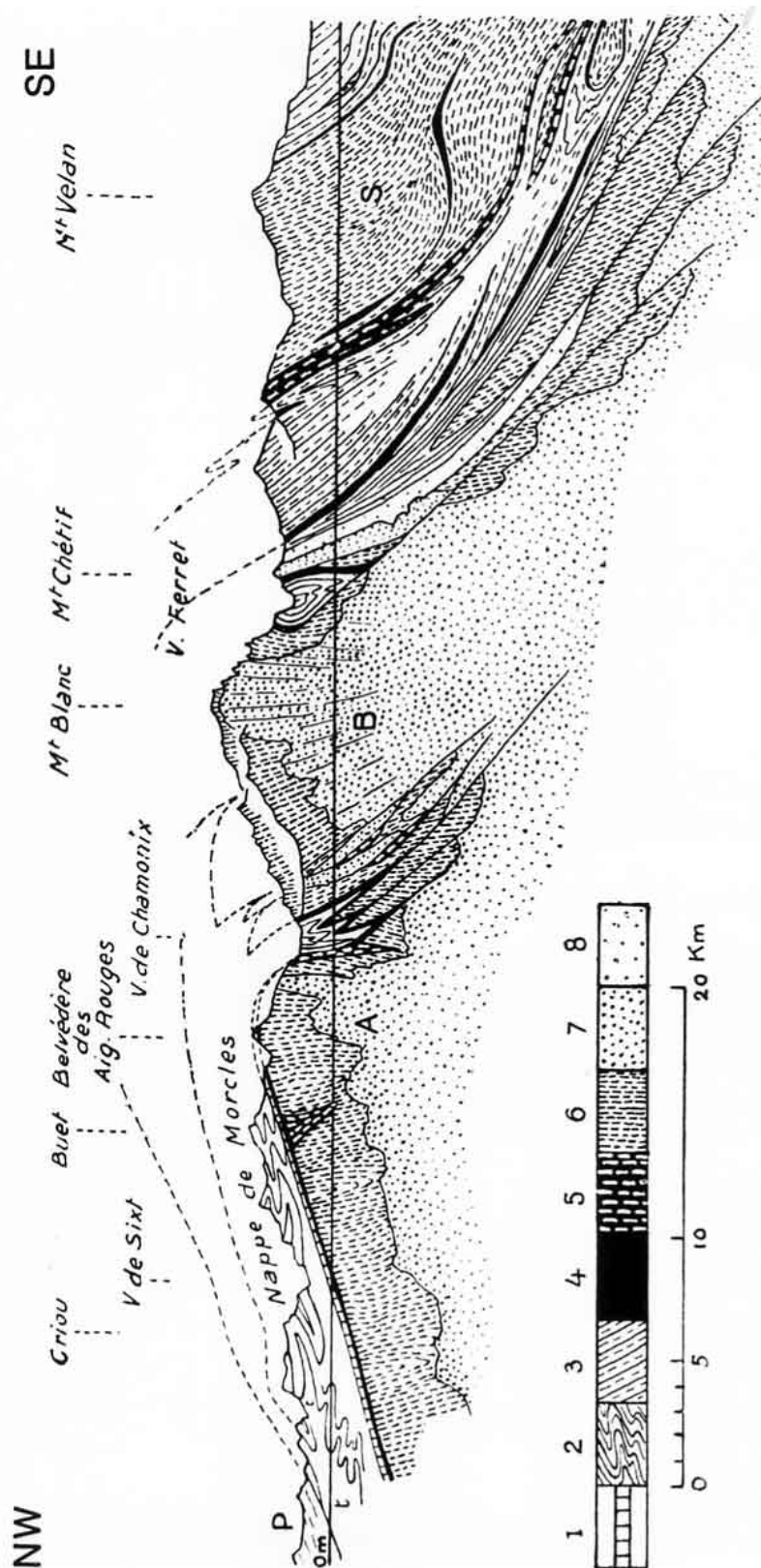


Fig. 3 - Coupe transversale du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges.

A : Batholite granitique des Aiguilles Rouges ; B : Batholite granitique du Mont-Blanc avec réseau de fractures en éventail ; S : Nappe du Grand St. Bernard ; P : Préalpes ;
 1 : Autochtone (Jurassique-Crétacé) ; 2 : Hautes Alpes calcaires ; 3 : Mésozoïque des nappes penniques ; 4 : Trias ; 5 : Carbonifère ; 6 : Schistes métamorphiques ; 7 :
 Granite ; 8 : Quartz porphyres (modifié d'après Collet, 1935, fig. 12).

L'observation des structures alpines par de Saussure entre Genève et Chamonix reste relativement limitée car il suit la route principale au fond de la vallée de l'Arve, remonte vers le haut des pentes adjacentes, ou s'aventure dans des vallons transversaux, mais n'atteint que les bases des hauts sommets comme les Aiguilles de Chamonix.

Il ne voit naturellement que les grandes lignes : à partir de Genève, d'abord un vaste ensemble calcaire plissé et bien exposé, dont les couches, en faisant abstraction des plis, augmentent d'inclinaison vers le centre des Alpes ; puis un groupe de roches devenant de plus en plus verticales, comprenant celles dites de "transition" (surtout schisteuses) suivies par les schistes micacés primitifs ; enfin le cœur du massif du Mont-Blanc représenté par les gneiss et le granite. Le tout, symétrique pour l'ensemble des Alpes, présente l'aspect d'une série de cartes à jouer imbriquées dont l'inclinaison augmente jusqu'à la verticale au centre (Fig. 4).

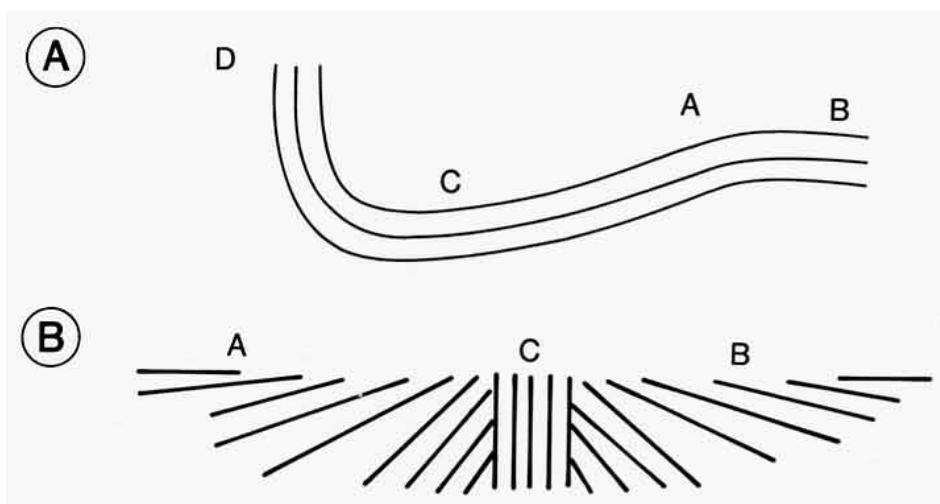


Fig. 4 - A. Coupe schématique du grand plissement des grès molassiques d'Alby-sur-Chéran (Haute Savoie), redessinée d'après de Saussure (Ms 17, 1784, 1, 13). B. Coupe schématique transversale et généralisée des Alpes, redessinée d'après de Saussure (Ms 17, 1784, 1, 15).

La logique stratigraphique et structurale conduit au concept de la "stratification" verticale du granite

La véritable démonstration pour de Saussure de la précipitation et cristallisation du granite dans l'océan primitif se trouverait dans sa disposition en couches et dans l'inclusion en son sein d'organismes fossiles. La stratification indique probablement des interruptions ou des changements dans la précipitation et la cristallisation dans l'océan primitif ou même l'effet de quelques courants.

Selon les idées neptunistes, la superposition horizontale des divers types de roches devait être : granite - gneiss - schistes primitifs - schistes "de transition" - roches secondaires. Or, en remontant la vallée de l'Arve vers l'axe de la chaîne, de Saussure observe en effet la série qui commence par les roches secondaires et se poursuit jusqu'aux termes les plus anciens, mais les couches, au lieu d'être horizontales ou faiblement inclinées, montrent un pendage de plus en plus accentué jusqu'à la verticale dans les schistes primitifs.

De Saussure s'attendait probablement à trouver le granite du Mont-Blanc avec une structure massive ou montrant tout au plus des couches horizontales. Mais la liaison étroite qu'il observe entre schistes de "transition", schistes micacés primitifs et granite et la verticalité des deux premiers termes le conduit logiquement à penser que le granite devrait être aussi en couches verticales. En effet, il voit dans les masses granitiques des systèmes de fractures et de joints verticaux ou légèrement courbes rendus évidents par l'altération atmosphérique en haute altitude. La logique exige qu'il interprète ces caractères comme des plans de stratification verticaux.

Il fait donc le grand pas théorique qui va le séparer de ses prédécesseurs, le mettre en complète opposition avec les idées courantes à l'époque, et lui poser dès lors un problème fondamental.

On comprend aisément qu'en dépit du parallélisme "évident" qu'il voit entre schistes primitifs verticaux et feuillets adjacents verticaux de granite, il sera obsédé toute sa vie par la pensée d'avoir pu confondre surfaces de stratification et plans de fracture. Il est en effet bien au courant de l'action des phénomènes atmosphériques en plaine et en haute montagne, qui conduisent à des aspects trompeurs.

Nous savons aujourd'hui que l'interprétation du granite en couches était en effet une erreur, mais une erreur "féconde" car de Saussure va en déduire une série de raisonnements dans sa recherche d'une explication générale qui finalement aboutira, après de nombreuses années de réflexion, à des conséquences spectaculaires, à savoir son concept de refoulements horizontaux, base de la tectonique moderne des nappes de charriage.

L'ensemble roches de "transition" - schistes primitifs micacés - gneiss - granite est maintenant structuralement homogène et s'articule avec les couches calcaires plissées des Hautes Alpes calcaires. Tout l'édifice alpin est donc prêt pour une explication unificatrice qu'il aborde avec une attitude complètement ouverte et purement logique.

1758-1772

Première hypothèse. Dépôt, verticalité et plissements des roches primitives par cristallisation sous-marine

Quel pourrait être le mécanisme capable de mettre en position verticale toutes les couches primitives et expliquer en même temps leurs fréquents plissements en C ou en Z, surtout dans les gneiss ?

Pour de Saussure, ces formes des couches primitives sont semblables à celles observées depuis longtemps, mais à petite échelle, dans les couches de travertin ou d'albâtre et dans de nombreux types de concrétions calcaires des cavernes, et même siliceuses comme les agates qui ornaient plus d'un cabinet de curiosités de la nature, y compris le sien. Les naturalistes de son époque, y compris de Saussure, grand expérimentateur lui-même, se sont penchés sur ces problèmes curieux dans de nombreuses expériences de laboratoire en faisant cristalliser divers types de sels minéraux et en obtenant, sur le fond et sur les parois verticales des réceptacles, des structures de formes bizarres et des couches semblables à celles déposées par la nature.

A l'époque, on ignorait que le problème de l'échelle des phénomènes pouvait être d'importance critique et que les mécanismes n'étaient pas les mêmes à petite et à grande échelle alors que les formes géométriques étaient semblables. Dès lors une transposition ne présentait aucun problème philosophique ; c'était une forme d'expression de l'ancienne philosophie du microcosme et du macrocosme.

Il est donc acceptable de penser que les couches verticales de granite représenteraient des précipitations et cristallisations successives formées sur les parois d'un gigantesque réceptacle géologique.

Objections à la cristallisation

De Saussure écarte assez rapidement l'hypothèse de la cristallisation pour les raisons suivantes :

1. Le réceptacle géologique est difficile à concevoir car le granite étant le premier produit de précipitation et cristallisation au fond de l'océan universel, ce dernier n'avait pas de bassin proprement dit avec des bords puisqu'il couvrait toute la terre et la précipitation devrait former des couches horizontales.
2. En prenant la position extrême de penser que les schistes micacés primitifs ou les schistes de "transition" font office de paroi verticale de réceptacle pour la précipitation du granite, ces conditions s'avèrent impossibles car d'abord les schistes sont d'âge plus récent et étant eux-mêmes aussi verticaux, ils exigent à leur tour une paroi verticale d'appui qui n'existe pas. Le résultat de ce raisonnement est absurde (Ms 14, 1775,3/2,66).

3. Les cristallisations en laboratoire ont été faites au moyen de cristaux de composition uniforme, un ou deux sels chimiques entrent en jeu, les cristaux sont en général presque invisibles (cristallisations confuses), or les cristaux des granites sont grossiers, de la taille de grains de sable, et les précipitations artificielles ne produisent jamais une association de plusieurs minéraux (quartz, feldspath et micas) comme un granite.

Deuxième hypothèse. Bouleversement souterrain d'origine inconnue

La cristallisation étant provisoirement abandonnée comme cause de la verticalité, de Saussure est forcé de reconsidérer l'ensemble des roches primitives et de "transition", c'est-à-dire la partie axiale de la chaîne, comme ayant été déposée horizontalement et, ensuite, après durcissement, soulevée et redressée en position verticale par un mécanisme souterrain qui reste inconnu.

Il avoue son impuissance car le reste de la chaîne alpine qui montre des structures encore plus compliquées échappe à l'explication d'une manière encore plus évidente. Il est clair que l'objet du raisonnement ne contient pas toutes les données nécessaires pour atteindre une conclusion sur l'ensemble. Il doit donc essayer de comprendre la formation des autres parties, en particulier les chaînes calcaires dont les structures sont bien exposées.

Retour à la cristallisation sous-marine à propos du Salève

Dans son analyse de la structure du Salève qu'il a parcouru depuis 1758 (VA, I, 1779, § 238-241), de Saussure pense que cette montagne, formée sous la mer comme toutes les montagnes calcaires, a eu des couches inclinées des deux côtés et que des révolutions dont il ignore la nature ont détruit la partie descendante vers Genève en laissant à découvert leur tranche escarpée contre laquelle des couches verticales se sont formées par cristallisation. En effet, il écrit que les calcaires sont le produit de cristallisations confuses résultant du fait que les particules minérales de la plus grande ténuité, suspendues dans un liquide, peuvent s'agglutiner et former des couches verticales ou contournées. Il ajoute aussi que les sédiments proprement dits d'origine mécanique comme ceux déposés par l'Arve qu'il observe tous les jours (graviers, sables et argiles, et équivalents : conglomérats, grès et schistes) n'ont jamais pu prendre de telles formes.

Le Salève fournit donc un escarpement qui est l'équivalent de la paroi du réceptacle de laboratoire contre lequel une cristallisation calcaire en couches verticales peut avoir lieu. De Saussure est encore plus convaincu par le fait que les couches verticales ont une couleur différente de celle des couches horizontales et sont plus finement stratifiées (en fait, il s'agit de l'effet de l'altération plus grande et de l'éirement tectonique du flanc vertical ou renversé du pli, formé de Crétacé inférieur tandis que les calcaires horizontaux sont du Jurassique supérieur) : ce sont pour lui deux types de cristallisations sous-marines de particules extrêmement ténues. A ce stade, de Saussure conçoit même que les Hautes Alpes calcaires soient appuyées par cristallisation calcaire en couches plissées et verticales contre les couches primitives redressées faisant office de paroi de réceptacle (Ms 14, 1775, 3/2, 66).

Méconnaissance de la nature véritable des calcaires : cause du retour à la cristallisation sous-marine.

De Saussure a observé au Salève (VA, I, 1779, § 245) la dualité fondamentale des carbonates : calcaires massifs à grands fossiles dispersés dans une pâte fine qu'il interprète comme les produits d'une précipitation chimique de particules très ténues ; calcaires entièrement composés de petits débris de coraux et de coquillages avec un ciment interstitiel de calcite transparente dont il ne comprend que vaguement l'origine mécanique. En effet, il ne pouvait pas, avec les connaissances rudimentaires de la sédimentologie de son époque, comprendre la dualité des carbonates. Il lui manquait d'observer par lui-même la sédimentation carbonatée moderne avec sa combinaison complexe de processus biologiques et mécaniques et de l'utiliser comme document comparatif pour établir la véritable nature des calcaires et en faire de vrais sédiments.

Il est vrai que la compréhension des carbonates était rendue encore plus compliquée par le fait que les calcaires minéralogiquement homogènes et ne montrant pas une association de différents minéraux, comme les grès par exemple, paraissaient différents des vrais sédiments pour lesquels les alluvions de l'Arve et du Rhône fournissaient un modèle de dépôt évident. Bref, tout paraissait indiquer pour l'instant que les calcaires représentent des roches particulières pour lesquelles les processus de cristallisation confuse semblent l'explication générale la plus vraisemblable.

Le pli du Nant d'Arpenaz face à la cristallisation sous-marine

De Saussure passe maintenant à l'étude des Hautes Alpes calcaires dont les plis complexes et bien exposés devraient fournir des arguments d'importance critique pour comprendre la genèse de la chaîne alpine.

Il a observé le pli en S du Nant d'Arpenaz, appartenant à la nappe de Mordes, de nombreuses fois lors de ses voyages à Chamonix et autour du Mont-Blanc. Ce pli est frappant par l'extrême disharmonie entre l'enveloppe extérieure de calcaires massifs et la partie interne plissotée de manière complexe (Fig. 5). On sait aujourd'hui qu'une telle disharmonie résulte du comportement ductile ou rigide de divers matériaux sous contrainte lors d'un seul événement tectonique, mais pour de Saussure le problème est déconcertant.

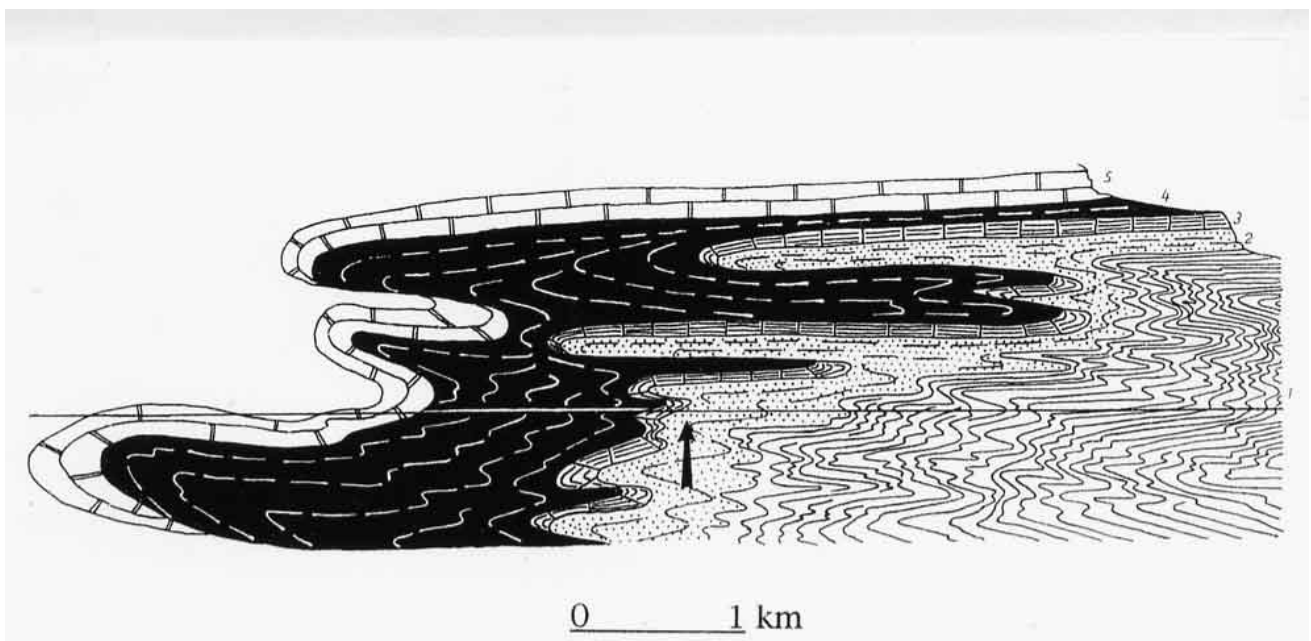


Fig. 5 - La dissymétrie de plissement de la nappe de Morcles dans la vallée de l'Arve, entre le Jurassique supérieur (Malm) et le Bajocien supérieur. 1 : Toarcien-Aalénien. 2 : Bajocien inférieur. 3 : Bajocien supérieur. 4 : Bathonien-Callovien-Oxfordien. 5 : Malm. La flèche noire indique la position du pli en S de la Cascade d'Arpenaz, la ligne

horizontale représente le cours de l'Arve. Échelles horizontale et verticale identiques (modifié d'après Collet, 1943, fig. 11).

Sa première interprétation est un essai d'application de l'hypothèse de la cristallisation : l'enveloppe extérieure à grande courbure de calcaires massifs est une forme produite par la cristallisation confuse, comme les plis dans les travertins et agates tandis que les schistes à intercalations calcaires de la partie interne du pli résultent d'une cristallisation "bien organisée", terme indéfini (cristaux bien visibles ou alternances de vrais sédiments et de précipitations chimiques ?). De Saussure se rend compte que cette solution est trop facile et peu satisfaisante. Elle est abandonnée, mais toutes les roches formant le pli exigent un examen de terrain plus approfondi lors de futurs voyages (VA, I, 1779, § 472).

Le pli du Nant d'Arpenaz : double origine, impasse philosophique

De Saussure constate avec une certaine surprise que le grand pli en S formé par les calcaires massifs présente des fractures radiales aux points de plus forte courbure (VA, I, 1779, § 475) mais, pour l'instant, il ne fournit pas de commentaires sur ces faits (indiquant un comportement rigide) qui sont en apparence contradictoires avec les caractères d'un pli formé par une cristallisation confuse lors de son dépôt dans un milieu aqueux. De telles fractures n'existent pas dans les courbures des travertins et des agates.

Les plissements complexes de la partie interne du pli, qui sont constitués de schistes argileux à intercalations calcaires, sont en fait de vrais sédiments, équivalents aux argiles. Or de Saussure a interprété la déformation de ces vrais sédiments comme s'étant faite après leur dépôt et leur durcissement par une force souterraine inconnue.

L'impasse est par conséquent la suivante :

Une même structure, à savoir le pli du Nant d'Arpenaz, résulte de deux causes entièrement différentes non synchrones : son enveloppe externe de calcaires massifs est le produit de la cristallisation confuse en milieu aqueux, sa partie interne est le produit d'une force souterraine après dépôt et durcissement. Le dilemme est de taille et la logique montre à de Saussure que l'erreur d'interprétation se trouve dans le problème des calcaires, mais il avoue ne pas comprendre.

1773

Facteur extérieur : le voyage en Italie conduit à la compréhension de la véritable nature des calcaires

Le voyage en Italie (1772-1773) entrepris pour des raisons médicales introduit de Saussure non seulement au volcanisme du Vésuve et de l'Etna, mais lui permet aussi d'observer le long des côtes d'une mer chaude, la Méditerranée, à Livourne et à Palerme en particulier, des calcaires tendres très fossilifères compacts et bioclastiques de type panchina du Pléistocène (Sicilien), bordés à leur tour du côté de la mer par une frange de dépôts actuels calcaires de type "beachrock". En observant ces roches produites par la combinaison de processus organo-chimiques et mécaniques, de Saussure se rend compte que les calcaires sont de vrais sédiments au même titre que les conglomérats, grès et schistes, mais évidemment de nature monominérale (Ms 28, 10 et 30 mai 1773 ; Saussure in Lettre à Hamilton..., 1774, publiée en 1776).

Cette démonstration de l'origine des calcaires s'achève par l'observation à Foligno, en Ombrie, d'une série fortement inclinée de couches alternantes de calcaires et de schistes bleus (Aquitaniens des Apennins) indiquant déformation simultanée après durcissement des deux lithologies (Ms 28, 5 juillet 1773 ; Saussure, op. cit., 1774, publiée 1776).

1774-1780

Troisième hypothèse. La force verticale souterraine comme concept tectonique unificateur

De Saussure comprend maintenant que les calcaires étant de vrais sédiments, au même titre que les grès et les schistes, ont été déposés en couches horizontales, durcis et ensuite soulevés, mis en position inclinée ou verticale ou encore plissés de manière complexe par un bouleversement souterrain, une force verticale d'origine inconnue.

Cette hypothèse rejoint donc celle acceptée auparavant pour les granites et roches primitives verticales de la partie axiale des Alpes. Le processus considéré est une explosion de fluides élastiques dans de grandes cavernes à l'intérieur du globe, explosion qui s'est produite dans un passé récent, il y a environ 100.000 ans. La nature de ces gaz n'est pas précisée, mais ils ne sont pas liés aux feux souterrains. En effet de Saussure insiste sur l'absence totale dans les Alpes de phénomènes volcaniques (Ms 14, 1775,3/2,66).

Le résultat a été le soulèvement et la mise en position verticale des couches primitives et des schistes de "transition" qui percent les roches secondaires calcaires et schisteuses. La verticalité des schistes de "transition" est démontrée par leur intercalation de conglomérats (poudingues) de Vallorcine (Ms 15, 1776, 3/1, 57-73 ; VA, II, 1786, § 687-695). Les roches secondaires demeurent appuyées très obliquement contre les primitives tout en se déformant de manière complexe mais avec une intensité qui décroît vers l'extérieur de la chaîne (théorie de 1774 [vision depuis le sommet du Cramont], Ms 14, 1774, 2/1, 21-25 ; Ms 15, 1778, 2/1, 45-53 ; VA, II, 1786, § 919 ; voir aussi pour les montagnes de Grindelwald, Ms 14, 1777, 1/7, 46-65, redécrit et réinterprété en 1783 dans VA, III, 1796, § 1677). Dans cette hypothèse, la force principale verticale agit sur le centre de la chaîne et les bords s'adaptent à la déformation axiale (Fig. 4 B).

Il est intéressant de trouver dans le manuscrit du Voyage en Italie (Ms 28, 26 juillet 1773) l'idée de rechercher l'existence possible de grands lambeaux calcaires, horizontaux ou faiblement inclinés, reposant sur le sommet des roches primitives verticales qui les auraient emportés lors du percement instantané lié à leur soulèvement. Cette situation d'origine mécanique qui, de l'avis de Saussure, aurait démontré sa théorie de la formation des Alpes, simule géométriquement une discordance angulaire à 90° de type Hutton, sans impliquer la suite d'événements géologiques de longue durée qui la caractérise.

Les limites de la force verticale : La disharmonie tectonique reste toujours énigmatique

En appliquant l'hypothèse d'une force souterraine verticale, de Saussure croit comprendre assez aisément l'origine des grands plis simples en C ou en S formés de couches calcaires épaisses, fracturées aux points de courbure maximale, comme l'enveloppe extérieure du pli du Nant d'Arpenaz. Ces "couches repliées sur elles-mêmes" (VA, I, 1779, § 473) semblent toujours accompagnées latéralement par un vide dans le paysage, qu'elles semblent avoir laissé en se relevant et en se repliant, par exemple le vide au nord du pli du Nant d'Arpenaz.

Les plissements complexes des schistes argileux à intercalations calcaires de la partie interne du pli, et dont les courbures aiguës ne montrent pas de fractures, continuent à intriguer de Saussure. Il suggère deux explications :

1. Les microplis compliqués ont été formés avant le plissement principal quand ces couches étaient molles et "parfaitement flexibles", mais il avoue ne pas comprendre ce mécanisme qui, d'ailleurs, contredit son postulat principal de plissement après durcissement des couches.
2. Les microplis compliqués ont été produits par la cristallisation au fond de la mer et ensuite incorporés dans le plissement principal ultérieur. Cette hypothèse vraiment périme, mais tenace dans l'évolution de sa pensée, contredit le fait que ces couches sont surtout schisteuses, donc de vrais sédiments. De ce fait l'idée de la cristallisation est inapplicable.

Le problème de la disharmonie tectonique du pli du Nant d'Arpenaz reste donc en suspens. D'autres exemples semblent nécessaires, ils ne manquent pas. Mais, il faut d'abord essayer de caractériser la force souterraine verticale pour mieux comprendre ses effets.

La force verticale souterraine est de nature sismique : la "grande débâcle", conséquence logique et inattendue

De Saussure a toujours été impressionné par les tremblements de terre et s'est intéressé à l'interprétation de leurs causes. Il repense maintenant aux sédiments et aux énormes blocs de roches alpines, surtout primitives, transportés à grande distance des deux côtés des Alpes par la "grande débâcle" qui a suivi la phase finale de soulèvement et plissement de la chaîne (glaciaire quaternaire encore non compris à l'époque).

Ces blocs de roches primitives n'étant pas des bombes volcaniques liées à une action des feux souterrains, de Saussure considère que leur origine première doit résulter d'un processus de déformation et fragmentation des couches à grande échelle suivi de la dispersion des débris sous forme d'un conglomérat non encore consolidé recouvert par des sables dans un ordre indiquant l'action de la gravité. C'est l'origine de l'idée que la force souterraine est en fait "un extraordinaire choc sismique", violent et instantané (VA, I, 1779, § 594-596 ; IV, 1796, § 2303). Il pense sans doute à la nature si destructive des tremblements de terre dont de nombreux exemples ont été décrits durant ce siècle (Lisbonne, 1755 ; Calabre et Sicile, 1783, etc., voir aussi Carozzi & Newman, 1995 b). Saussure étend par la suite son interprétation sismique aux autres conglomérats plus anciens consolidés qu'il a observés dans les Alpes, comme celui de Vallorcine en 1776 (Carozzi, 1989).

Etude d'autres plis complexes : la force sismique verticale reste indémontrable et la disharmonie toujours insaisissable

Saussure espère que l'observation de nouveaux exemples pourrait éclaircir ses idées. Il examine les plis des calcaires jurassiques de la vallée de la Reuss entre Amsteg et Ertfeld, les bords du lac d'Uri entre Flüelen et Brunnen avec leurs plis complexes dans les calcaires crétacés (Ms 14, 1775, 3/2, 63-64), ceux des calcaires jurassiques de la vallée de Meiringen (Ms 14, 1777, 1/7, 56), et enfin les plis des calcaires jurassiques dans les gorges du Gardon ou Porte des Cévennes, près d'Anduze (Ms 14, 1776, 2/4, 2-3). Ce sont des ensembles de plis beaucoup plus grands que le pli du Nant d'Arpenaz et qui montrent une juxtaposition de structures différentes mais toujours trop compliquées. Par conséquent, de Saussure n'observe pas de faits vraiment nouveaux qui apporteraient une interprétation plus décisive. En réalité, la disharmonie n'est toujours pas comprise et la véritable nature de la force sismique verticale reste indémontrable et insaisissable.

Néanmoins, de Saussure lance momentanément une nouvelle hypothèse pour expliquer le soulèvement des couches primitives en position verticale par un "extraordinaire choc sismique". Il s'agit de "l'hypothèse de l'enfoncement de la croûte supérieure" (Ms 14, 1775, 3/2, 65-67), un concept assez confus et certainement éphémère qui peut se résumer comme suit.

Le fond de l'océan universel est une croûte soutenue en divers endroits par des "appuis solides". Elle possède également des irrégularités qui ont déterminé les emplacements privilégiés de la cristallisation en couches horizontales des roches primitives. Sous ces élévations primordiales, les appuis solides se rompent brusquement par effet de surcharge, et les roches primitives ayant perdu leurs bases se redressent en couches verticales perçant les couches secondaires qui se déforment comme dans l'hypothèse de 1774.

Un nouvel examen d'ensemble du pli du Nant d'Arpenaz (Ms 15, 1780, 1/8, 1), que de Saussure considérait comme le meilleur exemple de plissement (repliement), lui fait même douter si un mouvement vertical agissant sur une couche horizontale est suffisant pour former un pli couché en C et encore plus difficilement un pli en S. Il se demande même si deux mouvements verticaux seraient capables de le faire.

1780-1796

Quatrième hypothèse. La force sismique est horizontale avec une composante verticale. La clé du concept de refoulements horizontaux en sens contraires : le grand plissement de la molasse d'Alby-sur-Chéran, Haute-Savoie

Des observations supplémentaires des plissements faites lors du deuxième tour du St. Gothard aux endroits déjà étudiés en 1775 et 1777 : Amsteg, Altdorf, Flüelen, et Meiringen (Ms 16, 1783, 1, 9, 59-60), et un nouvel examen des conglomérats verticaux de Vallorcine (Ms 17, 1784, 1, 1-4) n'apportent rien de nouveau.

Mais l'étude de la région d'Alby-sur-Chéran permet pour la première fois à de Saussure (Ms 15, 1780, 7, 2 ; Ms 17, 1784, 1, 11-16 ; Ms 96, 1786, 1, 105 ; VA, III, 1796, § 1165-1166) de suivre une série épaisse de couches de grès de la molasse marine supérieure subalpine. Ces couches montrent, d'une manière simple et claire, le passage latéral d'une position horizontale par celle d'un synclinal où elles sont abaissées à une position verticale redressée (Fig. 4 A, Ms 17, 1784, 1, 13), une situation très rare et surprenante pour des grès tertiaires dans une plaine assez loin des Alpes. Pour obtenir cet ensemble de structures juxtaposées dans les mêmes lits de grès, de Saussure conclut qu'il faut un refoulement horizontal contre un obstacle.

Les conséquences fondamentales que de Saussure tire du cas d'Alby-sur-Chéran, et qui pourront bientôt s'étendre à l'ensemble des Alpes, sont les suivantes :

1. Le refoulement horizontal générateur de plissements possède une composante verticale et ce n'est plus une simple force verticale qui forme les plis.
2. Par conséquent, il n'y a pas de différence génétique fondamentale entre couches sédimentaires verticales et couches plissées, ce sont deux aspects d'un même processus.
3. Le refoulement horizontal dans le cas présent est unilatéral et exige un obstacle contre lequel les couches sont plissées et redressées.

Mais, les conclusions d'un examen plus approfondi sur le terrain (Ms 17, 1784, 1, 14) semblent indiquer que le massif de couches verticales est renfermé entre des couches inclinées en sens contraires comme dans diverses montagnes des Alpes. De Saussure n'a pas illustré cette interprétation, mais si l'on imagine deux représentations de la structure qu'il a illustrée (Fig. 4 A), juxtaposées de manière inverse par leur parties verticales on obtient, toutes proportions gardées, la coupe transversale des Alpes (Fig. 4 B). Par conséquent, des refoulements horizontaux en sens contraires sont la conséquence inéluctable.

Tout n'est cependant pas encore complètement expliqué car les exemples précédents ont été pris dans des calcaires et des grès plissés et il reste encore à rendre compte de l'attitude verticale des roches primitives sans plis ou charnières anticlinales ou synclinales visibles. Ces couches exigent une explication compatible avec les autres car elles forment un seul et grand ensemble structural.

Dualité structurale fondamentale : anticlinaux calcaires droits à flancs verticaux et à charnières, roches primitives verticales sans charnières visibles. Impasse philosophique, raisonnement rétrograde temporaire Les roches primitives du Mont-Blanc (granite, gneiss, schistes micacés) apparaissent comme des lames verticales sans charnières visibles, du moins dans l'état des connaissances de géologie structurale de l'époque et en l'absence de tout concept de métamorphisme. De Saussure ne pouvait pas savoir que la compression tangentielle d'une série plissée métamorphique poussée à l'extrême transforme des plis ordinaires initiaux en une série de couches à foliation verticale par destruction quasi-totale des charnières originales anticlinales et synclinales. Le même phénomène existe dans les glaciers sous la forme de foliation verticale longitudinale de la glace (Fig. 6). De Saussure a observé cette structure dans le glacier d'Otemma en 1781 (Carozzi & Newman, 1995 a) sans naturellement pouvoir en comprendre la genèse.

Comment le refoulement horizontal et sa composante verticale peuvent rendre compte en même temps des roches primitives verticales sans charnières visibles et des calcaires plissés à charnières spectaculaires est un dilemme qui, pour l'instant, laisse de Saussure profondément perplexe. Devant cette impasse philosophique, il va même envisager l'impensable, à savoir, les affaissements proposés par son rival Jean-André [Deluc](#) (voir Ms 14, 1775, 3/2, 65-67, et Carozzi, 1987). Mais après cet instant d'incohérence, la simulation en laboratoire des effets du refoulement latéral lui semble la seule voie pour trouver le mécanisme unificateur.

Confirmation des effets du refoulement latéral par des expériences de laboratoire

Ses essais ont eu lieu 31 ans avant ceux de [James Hall](#) (1815) et 94 ans avant ceux d'[Alphonse Favre](#) (1878).

Il décrit (Ms 17, 1784, 1,16) qu'avec un drap épais, étendu et glissant sur une table fortement inclinée et retenu en bas, des couches verticales se forment avec des sommets arrondis (anticlinaux à flancs verticaux), mais ils n'en auraient pas si le drap se comportait comme une matière "fragile". Il faut donc une certaine "ténacité" pour que tout ne se brise pas.

Ensuite (Ms 96, 1786, 1, 105) il considère une ligne (probablement une cordelette) :

B D C

étendue sur une table et, s'il presse cette ligne d'une main en B, et de l'autre en C, et en même temps rapproche ses deux mains vers D, il se forme des plis verticaux en B et C.

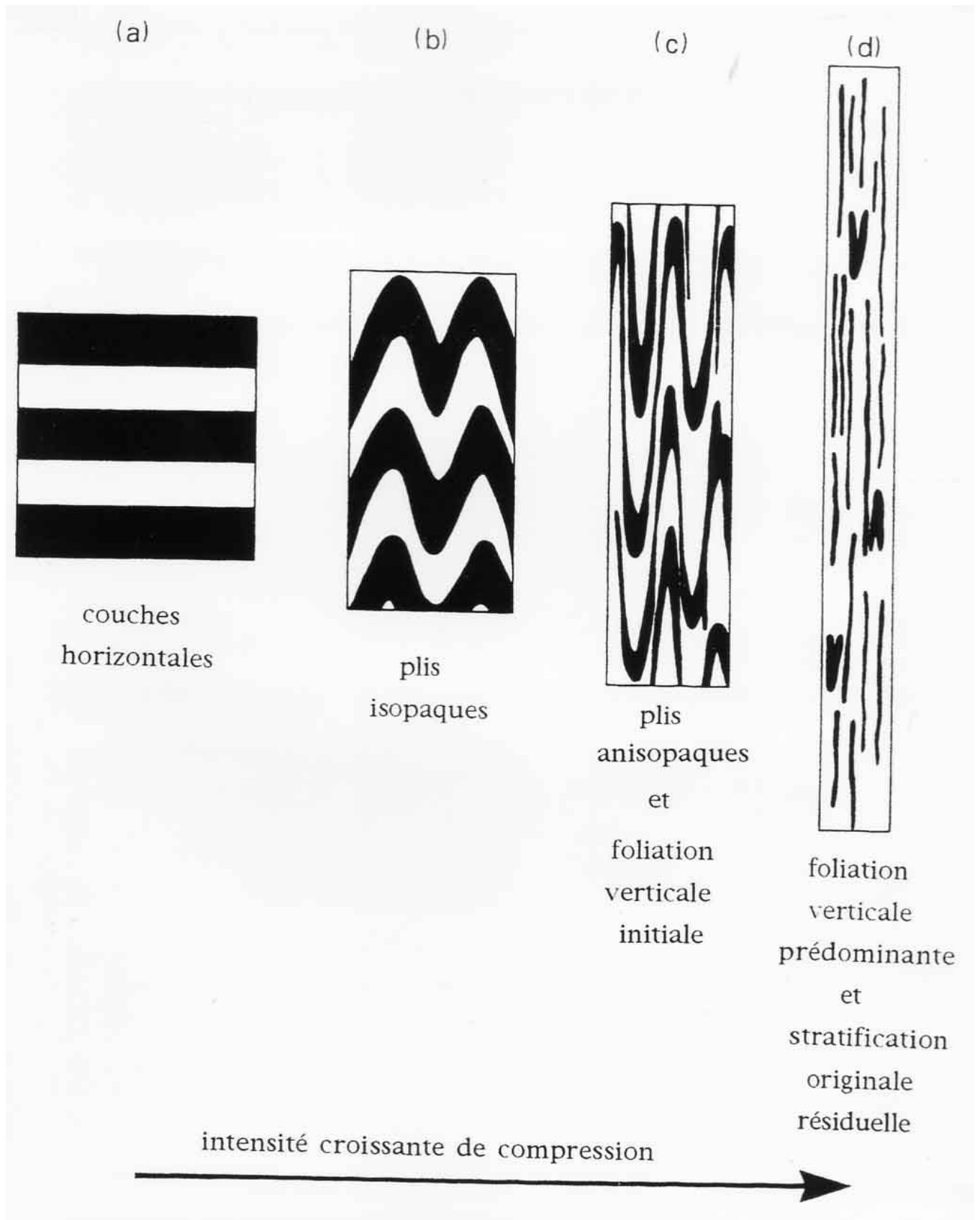


Fig. 6 - Développement d'une foliation par plissement et transposition des couches horizontales de glace stratifiée. Noter que la compression croissante de (a) à (d) s'accompagne d'un grand changement de forme générale. La foliation se développe dans les parties des couches originales qui ont été le plus amincies ; son orientation finale est perpendiculaire à celle des couches originales (modifié d'après Hambrey, 1994, fig. 2.22).

Les résultats de ces expériences, aussi rudimentaires soient-elles, sont importants (1784-1786) :

1. Le refoulement horizontal, s'il est unilatéral, exige un obstacle contre lequel les couches se déforment.
2. L'obstacle n'est pas nécessaire si l'on considère deux refoulements horizontaux en sens contraires.
3. Si les couches sont en matière "fragile" (rigides, cassantes) comme les roches primitives, elles se brisent en plaques qui se redressent jusqu'à la verticale comme des cartes à jouer imbriquées et les charnières n'existent pas.
4. Si les couches sont en matière "tenace" (ductiles) comme les calcaires, elles se plissent en anticlinaux droits ou de formes variées avec des charnières bien marquées.
5. Un plan de glissement doit exister à la base des deux types de couches déformées.
6. Il y a glissement, soulèvement général et redressement graduel des deux types de couches vers le centre du système lors de l'action de deux refoulements antagonistes et contre l'obstacle dans le cas d'un refoulement unique.

Ainsi la solution du dilemme présenté par les couches calcaires plissées et les roches primitives redressées verticalement au moyen d'un seul mécanisme est née de la compréhension rudimentaire par de Saussure du comportement des matériaux, à savoir de la différence entre des matériaux rigides "fragiles" et ductiles "tenaces".

Application des refoulements horizontaux en sens contraires à la mégatectonique alpine

De Saussure étend maintenant son concept unificateur à l'ensemble de la chaîne alpine (Fig. 4 B). Tout d'abord, il réaffirme la nature sismique du mécanisme comme suit (Ms 17, 1784, 1, 16) : "Il est difficile d'imaginer une autre manière [pour les couches] de passer de l'état horizontal à celui vertical que de supposer que des oscillations violentes de la surface de la terre [secousses alternatives du globe] ont fait glisser les couches et les ont forcées à se dresser les unes contre les autres".

Il est évident que la compression tangentielle vient des bords de la chaîne et que les couches verticales des roches primitives du centre de la chaîne correspondent au soulèvement maximal. Une conséquence fondamentale de la diminution de distance résultant de la compression horizontale, en l'absence d'éirement des couches, est l'existence de hiatus marginaux le long du plan de glissement. Il termine à ce propos (Ms 17, 1784, 1, 16) :

"Il faudra observer dans cet esprit, essayer de former des refoulements pareils avec des couches artificielles de glaise étendues sur une table, etc."

La transcription finale de ses notes (Ms 96, 1786, 1, 105), exprime toujours sa modestie et ses doutes perpétuels :

"En transcrivant cela le 23 novembre 1786, j'ajoute que les couches en S ou en C ou en Z paraissent aussi des effets et des preuves de ces refoulements. J'avoue qu'ils sont difficiles à expliquer, mais si les phénomènes l'indiquent clairement, la difficulté d'expliquer est un reproche à notre entendement et non pas une objection contre la vérité du principe."

Spéculation sur l'existence de refoulements profonds et superficiels

Après son ascension du Mont-Blanc en 1787, de Saussure est convaincu que l'hypothèse des refoulements horizontaux en sens contraires est le seul mécanisme possible, non seulement pour mettre les granites et autre roches primitives en position verticale, mais aussi pour les maintenir à une telle altitude.

Dans son dernier volume des *Voyages dans les Alpes...*, IV, 1796, § 1999, il fait une spéculation d'un grand intérêt géotectonique :

"...si l'on suppose, que le fond d'une vallée, de celle de Chamouni, par exemple, soit l'ancienne surface de la croûte, il s'ensuivrait de-là que la distance horizontale de la vallée de Chamouni à un point correspondant à la cime du Mont-Blanc, serait à-peu-près la mesure de l'épaisseur de la croûte qui a été refoulée ou rompue, & que, par conséquent, la cime du Mont-Blanc, qui est actuellement élevée d'environ une lieue au-dessus de la surface actuelle de notre globe, étoit dans l'origine enfouie de près de deux lieues [8,8 kilomètres] au-dessous de cette surface."

Cette spéculation peut être représentée graphiquement (Fig. 7) de manière à rendre compte au mieux de la plupart des structures décrites par de Saussure et expliquées au moyen de son hypothèse des refoulements horizontaux en sens contraires. Il est évident qu'elle n'implique pas qu'il aurait pu comprendre le concept de nappes ou celui des relations entre déformations simultanées profondes et superficielles.

Le rayonnement de Saussure

De Saussure est conscient de l'importance de sa découverte fondamentale des "refoulements horizontaux en sens contraires" à grande échelle comme le mécanisme de formation des Alpes et de toutes les grandes chaînes de montagnes. En fait, c'est une vision prophétique de la tectonique tangentielle moderne assez complète, comprenant les forces horizontales créatrices de nappes de charriage, la persistance de ces forces pour maintenir en place les structures formées, et finalement l'interprétation de l'activité tectonique et de ses paroxysmes comme des phénomènes sismiques.

L'évolution de la démarche scientifique de Saussure telle qu'elle vient d'être présentée, est bien illustrée dans sa lettre à Jean-Claude [de La Métherie](#), datée du 6 juillet 1795, concernant la *Théorie de la Terre* publiée par ce dernier en 1795 (in Favre, 1878, p. 195-196):

"J'observerai seulement que le système que vous avez exposé dans le II le volume sous le nom de système de Saussure, n'est point une suite d'opinions mûries et adoptées avec réflexion et maturité. J'ai présenté ces idées comme un rêve ou comme une suite d'images que le spectacle des montagnes visibles de la cime du Cramont pouvait réveiller dans la tête d'un géologue. Car je pense comme vous que l'explosion des fluides élastiques n'a point pu soulever et encore moins soutenir dans un état de soulèvement des masses telles que le M.-B. [Mont-Blanc] et ses alentours. Je tiens beaucoup plus à l'idée d'un refoulement. Mais tout cela est trop long pour une lettre, je développerai mes idées dans la suite de mon ouvrage."

Cette lettre démontre clairement, dans ses propres mots, que de Saussure a bien évolué de l'idée d'une force verticale à celle de refoulements horizontaux en sens contraires et ce qu'il pensait lui-même, à la fin de sa carrière en 1795, de l'élan poétique dont il avait été saisi au sommet du Cramont en 1774.

Mais son idée de refoulements horizontaux en sens contraires est surtout expliquée dans ses manuscrits inédits, mis au net en 1786 et réservés précieusement pour une démonstration finale dans sa *Théorie de la Terre* dont il n'a écrit que la table des matières avant son décès en 1799 (Carozzi, 1989). Des allusions trop brèves aux refoulements horizontaux se trouvent seulement dans les deux derniers volumes des *Voyages dans les Alpes...* publiés en 1796 (III, § 1166, 1677 ; IV, § 1937, 1996, 1999, 2002).

Bien que de Saussure ait posé le principe des refoulements horizontaux à grande échelle, qui est devenu la base de la tectonique tangentielle moderne, il n'a pas spéculé sur leur causes. Son concept reste temporairement en veilleuse. Une des raisons est certainement un manque de disciples ou d'élèves qui auraient pu développer et répandre ses idées. Que serait devenu [James Hutton](#) (1795) sans [John Playfair](#) (1802) et [James Hall](#) (1815) ? On sait que Hutton a utilisé comme observations illustrant sa propre théorie des extraits volumineux des deux premiers volumes des *Voyages dans les Alpes...*, car il considérait de Saussure comme "le plus fiable de tous les observateurs". On peut regretter, d'une part, que Hutton soit décédé avant d'avoir lu les deux derniers volumes des *Voyages dans les Alpes...*, et d'autre part, que de Saussure n'ait entendu parler que de manière indirecte de la théorie de Hutton.

Mais, le concept fondamental des refoulements horizontaux à grande échelle de Saussure n'est pas resté entièrement oublié. En effet, une poignée d'élus qui, n'ayant lu que les allusions très brèves de Saussure, ont cependant réalisé l'importance critique du sujet. Il faut citer [Alphonse Favre](#) (1878) lors de ses expériences de compression latérale et [Marcel Bertrand](#) (1908) dans son étude magistrale des refoulements de l'écorce terrestre qui ont engendré les nappes de charriage du bassin houiller franco-belge et des Alpes, et qui en attribue le principe à de Saussure.

Pourtant dans l'ensemble, les géologues et les historiens de la géologie ont ignoré la contribution fondamentale de Saussure pendant plus de deux siècles, en fait jusqu'à ces dernières années (voir Ellenberger, F., 1994, p. 287- 294), après que j'aie attiré l'attention de la communauté géologique en transcrivant les manuscrits inédits du grand

savant genevois.

Références

- BERTRAND, M. (1908). Mémoire sur les refoulements qui ont plissé l'écorce terrestre et sur le rôle des déplacements horizontaux. Paris, Gauthier-Villars, 267 p.
- CAROZZI, A. V. (1987). La géologie. De l'histoire de la Terre selon le récit de Moïse aux premiers essais sur la structure des Alpes et à la géologie expérimentale. In Trembley, J. (Ed.) : Les savants genevois dans l'Europe intellectuelle du XVIIe au milieu du XIXe siècle. Editions du Journal de Genève, Genève, p. 203-265.
- CAROZZI, A. V. (1989). Forty years of thinking in front of the Alps : Saussure's (1796) unpublished theory of the earth. Earth Sciences History, 8, p. 123-140.
- CAROZZI, A. V. (1992). [H.-B. de Saussure](#), pionnier de la géologie moderne. La Recherche, Paris, 23, No. 242, p. 414-422.
- CAROZZI, A. V. and NEWMAN, J. K. (1995 a). [Horace-Bénédict de Saussure](#), forerunner in glaciology. Soc. Phys. Hist. nat. Genève, Mémoire 48, 149 p.
- CAROZZI, A. V. and NEWMAN, J. K. (1995 b). Saussure's manuscript oration on earthquakes and electricity (1784) influenced by William Stukeley and Benjamin Franklin. Archives des Sciences, Genève, 48, p. 209-237.
- COLLET, L. W. (1935). The Structure of the Alps. London, Edward Arnold and Co. Second édition. Reprint with Introduction by Albert V. Carozzi, 1974, Huntington, New York, R. E. Krieger Publishing Co. Inc., 304 p.
- COLLET, L. W. (1943). La Nappe de Mordes entre Arve et Rhône. Berne, Mater. Carte géol. Suisse, N.S., 79, 146 p.
- ELLENBERGER, F. (1994). Histoire de la Géologie. Tome 2. La grande éclosion et ses prémices 1660-1810. Paris, Technique et Documentation Lavoisier, 381 p.
- FAVRE, A. (1878). Expériences sur les effets des refoulements ou écrasement latéraux en géologie. Archives des Sciences, Genève, LXII, p. 194-211. Voir aussi C. R. 1er Congrès géol. int. Paris (publié en 1880), p. 35-38.
- HALL, J. (1815). On the vertical position and convolutions of certain strata and their relation with granite. Trans. r. Soc. Edinburgh, 7, p. 79-108.
- HAMBREY, M. (1994). Glacial Environments. Vancouver, U. B. C. Press, 296 p.
- HUTTON, J. (1795). Theory of the Earth, with proofs and illustrations. In four parts. Edinburgh, printed for Cadell Jr., and Davies, London ; and Creech, Edinburgh, 2 vol.
- LA MÉTHERIE, J. C. (1795). Théorie de la Terre.... Paris, chez Maradan, 3 vol.
- PLAYFAIR, J. (1802). Illustrations of the Huttonian theory of the earth. Edinburgh, W. Creech. University of Illinois Press Reprint, 1956, Dover Reprint, 1964, 528 p.
- SAUSSURE, H.-B. (1776). Lettre à son Excellence M. le Chevalier Hamilton, Ministre Extraordinaire et Plénipotentiaire de sa Majesté Britannique, à Naples du 17 Décembre 1774 (Sur la géographie physique de l'Italie). Observ. Phys. Hist. nat. Arts, Paris, 7, p. 19-38.
- SAUSSURE, H.-B. (1779-1796). Voyages dans les Alpes, précédés d'un essai sur l'histoire naturelle des environs de Genève. Neuchâtel et Genève, Fauche, Barde-Manget, Fauche-Borel, 4 vol. in 4°.