

BEITRÄGE
ZUR
GEOLOGISCHEN KARTE DER SCHWEIZ

HERAUSGEGEBEN VON DER GEOLOGISCHEN KOMMISSION DER SCHWEIZ, NATURFORSCHENDEN GESELLSCHAFT

AUF KOSTEN DER EIDGENOSSENSCHAFT

NEUE FOLGE, XXXI. LIEFERUNG
DES GANZEN WERKES 61. LIEFERUNG

I. Les nappes de recouvrement des Alpes Pennines et leurs prolongements structuraux.

Par **Emile Argand.**

II. Die grosse Eiszeit in der Nordschweiz.

Von **Ed. Blösch.**

III. Zur Tektonik des Flysches in den östlichen Schweizeralpen.

Von **Arnold Heim.**

IV. Beobachtungen aus der Wurzelregion der Glarnerfalten (helvetischen Decken).

Von **Albert Heim.**



Bern.

In Kommission bei A. Francke (vorm. Schmid & Francke).

1911.

Buchdruckerei Stämpfli & Cie.

I.

Les nappes de recouvrement des Alpes Pennines et leurs prolongements structuraux.

Une carte tectonique et deux stéréogrammes, avec texte explicatif,

par

Emile Argand.

(Présenté à la Commission Géologique le 17 août 1910.)

Explication de la planche I.

Carte tectonique des Alpes Pennines.

1, massifs de l'Aar, du Mont Blanc et des Aiguilles Rouges (de Chamonix). 2, massifs du Gotthard et du Mont Chétif.

3, terrains à facies helvétique, et nappe du Mont Bonvin-Préalpes internes.

4 à 10, zone pennique.

4, aires synclinales, appartenant à la série pennique supérieure (= Mésozoïque moins les quartzites du Trias inférieur).

5 à 10, les principales aires anticlinales, appartenant à la série pennique inférieure. Je range sous cette appellation tous les terrains de la zone pennique qui sont antérieurs à la base du Trias calcaire, ou à celle des schistes lustrés à pietre verdi, quand le Trias calcaire fait défaut.

5, anticlinal de Verampio et plis-nappes du Simplon (Antigorio I, Lebendun II, Monte Leone III). Au Sud de la ligne Val Bognanco-Val Vigizzo, le quadrillé 5 signifie complexe inférieur au synclinal III—IV, en général.

6, 7 et 8, pli-nappe du Grand Saint-Bernard ou nappe IV. Schistes cristallins en partie antéhouillers (6), mais dont la partie haute, dans la mesure où il s'agit de dérivés sédimentogènes, est hétéropique avec le Carbonifère 7 et avec le niveau des quartzites 8, habituellement attribués au Trias inférieur. Le Permien est certainement représenté, à un niveau indéterminé dans la succession verticale 7—8, toutes les fois que cette succession est stratigraphiquement continue, ce qui est fréquent dans les Alpes Pennines extérieures.

9, pli-nappe du Mont Rose ou nappe V.

10, pli-nappe de la Dent Blanche ou nappe VI avec le paquet de digitations inférieur du *Mont Mary*, les lambeaux de recouvrement du *Mont Emilius*, du *Pillonet* et des *Aiguilles Rouges (d'Evolène)*. Racine dans la zone Sesia et ses prolongements.

11, zone du Canavese pro parte.

12, zone insubrienne (Massif des Lacs avec le complexe des gneiss Strona, les granites de Baveno-Motterone et la masse basique d'Ivrée. Cette zone renferme les racines austro-alpines.

13, porphyres et porphyrites.

14, Alpes calcaires Sud.

15, quaternaire.

- 16—24, légende spéciale pour les nappes penniques IV, V et VI, et pour la zone de Sion.
16, flancs normaux des plis-nappes et de leurs principales digitations. Contacts géologiques en général.
17, renversements locaux de flancs normaux; plis en retour des Mischabelhörner, de Rosa-blanche et du Val de Bagnes.
18, flancs renversés des plis-nappes et de leurs principales digitations.
19, flancs renversés ramenés à la normale par suite de déformations subordonnées, contemporaines du développement des nappes ou postérieures.
20, bord externe de la zone de Sion-Val Ferret.
21, chevauchement pennique frontal, amenant le Jurassique inférieur du bord externe de la zone de Sion sur celui du bord radical de la nappe du Mont Bonvin, avec interposition d'une lame très mince et discontinue de Trias calcaire.
22, chevauchement pennique frontal, interpolé sous les alluvions du Rhône valaisan.
23, lambeaux de recouvrement. 24, fenêtres tectoniques.
Les chiffres romains de I à VI expriment la superposition des nappes dans l'ordre ascendant, suivant la nomenclature de *Lugeon* et *Argand*¹⁾, mai 1905, et d'*Argand*²⁾, février 1906 (VI + VII *L.* et *A.* = VI *Arg.*). IV, V et VI sont les nappes dont l'existence, la succession verticale et les principales particularités tectoniques ont été établies par *Lugeon* et *Argand*³⁾ en mai 1905, en même temps que la superposition de IV à III.

Abréviations.

C, Cima Camughero. *C. D.*, Château des Dames. *C. S.*, Colle Selarioli. *M. L.*, Monte Leone. *Pd*, Piedimulera. *Pj*, La Preja. *Pr*, Prestino (Val Bognanco). *Ru*, Rumianca. *So*, Sonnhorn.

Explication de la planche II.

Stéréogramme schématique des Alpes Pennines.

La face supérieure du stéréogramme résume les principaux faits tectoniques observables en surface dans les Alpes Pennines centrales et orientales. C'est la moitié orientale de la carte tectonique pl. I, réduite à ses éléments fondamentaux et mise en perspective cavalière.

La face antérieure montre la structure profonde inférée de ces phénomènes de surface en vertu du principe de continuité axiale.

L'inscription de ces éléments dans un même bloc solide montre leurs dépendances multiples et leur coordination dans l'espace. Le dessin fait connaître, en première approximation et dans ses traits principaux, l'image stéréométrique plus complexe que je me fais de ces phénomènes.

Par suite de l'ascension graduelle de leurs axes vers le nord-est, les grands plis couchés parviennent successivement au jour, et d'autant plus loin vers le nord-est qu'ils sont plus profonds. Cela s'applique également aux divers motifs tectoniques qui constituent un même pli.

Pour reconstituer le profil transversal moyen d'après les données observables en surface, il faut donc mettre l'un au-dessous de l'autre les motifs tectoniques que la nature nous montre

¹⁾ *M. Lugeon* et *E. Argand*. Sur les grandes nappes de recouvrement de la zone du Piémont. C. R. Acad. Sc., 15 mai 1905. — Sur les homologues dans les nappes de recouvrement de la zone du Piémont. C. R. Acad. Sc., 29 mai 1905.

²⁾ *E. Argand*. Sur la tectonique du massif de la Dent Blanche. C. R. Acad. Sc., 26 février 1906.

³⁾ *M. Lugeon* et *E. Argand*, loc. cit.

l'un après l'autre en allant du sud-ouest au nord-est. C'est ce que la face antérieure du stéréogramme réalise.

Si, inversement, on se donne par hypothèse le système de plis couchés dessiné sur cette face antérieure, ainsi que la direction axiale moyenne, on pourra prévoir l'allure générale des bandes anticlinales et synclinales en surface, ainsi que leurs plongements aux points d'émergence. Sauf perturbations tout à fait locales, l'observation des faits dans la nature ne dément jamais ces prévisions, ce qui vérifie l'hypothèse.

Le sens des plongements constatés en surface se lit immédiatement en chaque point des contacts, grâce aux figurés¹⁾ employés, qui ont la même signification que dans la planche I, rubriques 16 à 24. Les localités importantes pour la diagnose des nappes ont été indiquées sur la face supérieure et projetées en direction axiale sur la face antérieure, pour faire sentir plus complètement leur position dans le système des plis. La flèche dessinée sur la face antérieure indique la projection horizontale de la direction moyenne de poussée, ce qui a été indiqué brièvement par „direction de poussée“. Les synclinaux de la zone pennique sont en pointillé.

Epaisseur du système de nappes I—VI: 15—20 kilomètres (estimation approchée).

Cette construction veut montrer l'essentiel, et n'a pas d'autre prétention. Elle reste nécessairement approximative dans le détail, pour diverses raisons dont voici les plus importantes:

- a) La direction des plis n'est pas rigoureusement constante, mais subit des inflexions locales de part et d'autre de la direction moyenne SW-NE.
- b) Le sens de la montée axiale reste le même dans toute l'étendue du territoire représenté (sauf complications locales), mais l'angle d'inclinaison axiale varie d'un point à un autre.
- c) La surface topographique a été ramenée à l'horizontale par construction. Cela n'a pas d'inconvénient pour le but que je me suis proposé.
- d) L'échelle adoptée oblige à simplifier ou à omettre des détails mineurs. Cette simplification se fait surtout sentir dans les digitations extérieures de la nappe IV (zone carbonifère), et dans les plis couchés de la zone du Combin.

1—2, synclinal couché III—IV.

1, 1, extension attribuée jusqu'ici au synclinal III—IV.

2, 2, parties plus internes de ce synclinal, reconnues par l'auteur.

3 à 6, nappe IV.

3, cuillère du Bortelhorn. 4—4', partie amincie de la nappe IV. La matière de cette nappe y a été laminée par l'avancée postérieure de la nappe du Mont Rose, et a flué vers l'avant en s'accumulant sous une épaisseur tectonique de 8 à 10 kilomètres dans les massifs de la Mischabel, du Weissmies et du Laquinhorn, pour y former, par encapuchonnement, l'énorme pli en retour de la Mischabel. 4, bande de Zwischbergen. *Pr*, cuillère de Prestino. 4', massif de Camughero, se continuant au sud par la Punta Ciapè, Prabernardo (*Pb*) et le Pizzo Cianghin. 5, Voûte raccordant la nappe IV à sa racine (charnière à la Miniera dei Cani sur Vanzone, Valle d'Anzasca). 6, racine IV.

7 à 12, synclinal IV—V, avec ses diverses branches. 7, 7, branche de Saas. 8, cuillère de Bognanco. 9, fenêtre-tunnel de Furggen. 10, branche d'Antrona. 11, voûte raccordant la branche d'Antrona à celle d'Anzasca. 12, branche d'Anzasca. 8 à 12 = substratum de la nappe du Mont Rose.

13—14, nappe V.

13, voûte de Vanzone. 14, branche de Bannio-Pizzo Castello.

15, synclinal V—VI ou d'Alagna.

16—17, synclinal IV—VI. 16, cuillère du Barrhorn. 17, branche du Brunnegghorn.

18, terrains à facies helvétique et nappe du Mont Bonvin. 19, zone de Sion.

¹⁾ Ces figurés ont été étendus aux plis-nappes du Simplon dans la mesure où le permet l'échelle, tandis qu'ils ont été omis dans les parties correspondantes de la carte tectonique pl. I, pour mieux faire ressortir les nappes IV, V et VI.

Abréviations.

C. S., Colle Selarioli. *Pb*, Prabernardo (Valle d'Antrona). *Pd*, Piedimulera. *Pr*, Prestino (Val Bognanco). *Ru*, Rumianca. *S*, Simplon-Pass. *S. D.*, Simplon-Dorf. *Vb*, Visperterbinen. *Vp*, Verampio. *Zw*, Zwischbergen.

Explication de la planche III.

Stéréogramme tectonique des Alpes Pennines.

Ce graphique exprime les mêmes relations essentielles que le précédent, mais les synclinaux penniques sont supposés vidés de leur contenu, pour mieux montrer la forme générale des anticlinaux et leur flottement en direction axiale. Le figuré qui exprime la structure intérieure des anticlinaux est nécessairement un schéma, mais j'y ai fait entrer beaucoup de détails réellement observés. Le noir plein correspond aux nappes du Simplon, et plus au sud, à tout ce qui se trouve au-dessous du synclinal III—IV.

Les chiffres et inscriptions de la planche II s'appliquent aux mêmes points de la planche III et avec la même signification.

Dans les trois figures, les synclinaux couchés V—VI, IV—V, III—IV, II—III, I—II et Verampio—I sont indiqués avec l'extension qu'on leur connaît actuellement vers l'intérieur de la chaîne.

Les deux stéréogrammes expriment l'idée que la prolongation sud-ouest du massif de l'Aar, au sud de Sierre et de Sion, est largement chevauchée par le bord antérieur de la nappe IV.

* * *

Par leur surface supérieure, les stéréogrammes pl. II et III résument les faits tectoniques visibles au jour; par leur partie profonde, ils les expliquent et les coordonnent en une seule image visuelle, en un seul acte de synthèse.

Tout se passe en surface, pour l'essentiel, comme si les grands plis couchés avaient en profondeur les relations indiquées, et j'en induis que ces relations existent réellement.

Les dimensions verticales des nappes pennines IV, V et VI sont considérables, et les chiffres de 10, 8 et 5 kilomètres, respectivement, donnent une idée approchée des évaluations auxquelles m'ont conduit des recherches détaillées. Comme d'autre part, les dénivellations topographiques existantes sur ce territoire atteignent rarement 3500 mètres, il n'y a aucun inconvénient, pour la suggestion visuelle que je me suis proposé de faire, à présenter les Alpes Pennines comme une section grossièrement horizontale pratiquée dans un système de plis couchés très épais, où prévaut la montée axiale vers le nord-est et l'est. C'est du reste grâce à ce dernier phénomène que les plis couchés deviennent démontrables: dans ses grandes lignes, le plan des Alpes Pennines n'est que l'image de leur profil, déformée et allongée par intersection oblique avec la topographie.

Les dimensions longitudinales du phénomène superficiel, ce sont les dimensions verticales du phénomène profond, allongées dans le sens SW-NE par sortie axiale oblique; quant aux dimensions transversales des plis couchés, la tectonique de surface nous les donne immédiatement.

* * *

La longue trace synclinale mésozoïque qui du Col Selarioli (*C. S.* sur les planches) remonte vers le nord à travers les vallées d'Antrona et de Bognanco, rejoint l'Alpe d'Arza (*Ar*), pénètre en Valais par le Col de Monscera, passe à Zwischbergen (*Zw*), se dirige vers le NW le long de la dépression du Simplon, se réfléchit à l'est au voisinage de ce col (*S*, pl. III) pour entourer la „cuillère du Bortelhorn“, revient à l'ouest en passant au nord de la digitation de Visperterbinen, conflue vers l'occident avec les schistes lustrés de Viège (*Visp*), de Rarogne (*Raron*), de Turtmann,

d'Agaren, et par eux avec la zone de Sion-Val Ferret aux environs de Sierre, cette longue trace, c'est le substratum de la nappe du Grand Saint-Bernard, ou nappe IV de MM. *Lugeon* et *Argand*. Ce substratum, énergiquement replié avec la nappe qu'il supporte, s'enfonce avec elle à l'ouest et au sud-ouest, en direction axiale. Les variations du plongement le long de la trace s'expliquent par les ondulations et les replis complexes du solide structural, et par l'émergence oblique de tout cela à la surface topographique. Mes stéréogrammes montrent les principaux détails de ce phénomène, dans la mesure où l'échelle permet de les représenter.

La „cuillère“ mésozoïque de Bognanco (8, pl. II) et les branches d'Antrona et d'Anzasca (10, 11 et 12, pl. II) du synclinal IV—V jouent le même rôle par rapport à la nappe du Mont Rose et font flotter sa partie couchée, en direction axiale. La nappe du Mont Rose est pourvue de plusieurs digitations, dont les plus importantes sont les deux plis frontaux et plongeants que j'ai figurés sous le nom de plis du Portjengrat et du Latelhorn. Ces deux plis plongeants sont séparés par un synclinal tourné à l'envers, la fenêtre-tunnel de Furggen, qui n'est qu'un diverticule du substratum de la nappe, fermé vers le haut.

La partie couchée des nappes IV et V se continue matériellement dans la partie enracinée; cette jonction s'opère, en surface, par des traces qui décrivent une incurvation rapide vers le sud-est, l'est et le nord-est, dans le Val d'Anzasca au nord de Vanzone et de Pontegrande. Mes stéréogrammes expliquent ce phénomène par la structure profonde, et du reste les charnières qu'il nécessite se voient fort bien sur le terrain.

* * *

Entre l'Alpe d'Arza et les environs du col du Simplon, les couches du synclinal III—IV se dirigent SE-NW, en travers des Alpes, et descendent plus ou moins fortement à l'W et au SW. Il en est de même pour la portion limitrophe des unités voisines, gneiss du Saint-Bernard et du Monte Leone.

Les stéréogrammes font voir comment j'interprète ce phénomène: ce qui est transversal, ce n'est pas la direction des plis, mais celle de leur trace sur la surface topographique. La direction des plis est longitudinale, SW-NE ou à peu près, et elle n'est autre que la direction alpine prédominante dans toute la région.

On sait que M. le professeur *C. Schmidt* s'est efforcé, en 1907, d'interpréter cette allure transversale des structures parallèles¹⁾, et croit y voir un faisceau de racines dirigées SE-NW, appartenant à des plis qui auraient marché vers le NE, c'est-à-dire à des plis transversaux très couchés. Issus de la dépression du Simplon et même de la région du Laquinhorn, ils auraient atteint, d'après M. *C. Schmidt*, les montagnes au sud du Binnental. Cela fait 18 kilomètres d'amplitude jusqu'au Bortelhorn et 25 jusqu'au Cherbadung, et l'on conviendra que c'est beaucoup pour des plis transversaux.

¹⁾ *C. Schmidt*. Über die Geologie des Simplongebietes und die Tektonik der Schweizeralpen. *Eclogae geol. Helv.* IX, 4, 1907, p. 522:

„Der halbkreisförmige Verlauf der Bündnerschieferbänder, Teggiolomulde, Vegliamulde, Monte Carnera-Mulde von Bosco im Tessin über Crevola, Zwischenbergen, Monte Leone u. s. w., ferner das Einfallen der Gneisse nach Südosten, Süden und Südwesten zeigen, dass die, je die Schiefer überschiebenden, Gneisscomplexe gegen Südosten, Süden und Südwesten ihre Wurzeln finden.“ Et plus loin: „Während also südwestlich der Simplonstrasse die Wurzeln der Antigorio-, Lebendun- und Leone-Gneisse in der Tiefe liegen, ragt diejenige der Berisalgneisse hoch empor in der Bergmasse des Rauthorns, Fletschhorns und Laquinhorns. Von hier aus sind die Berisalgneisse gegen Nordosten geschoben bis auf die Kämme südlich des Binnentales.“ Le profil construit par M. *Schmidt*, fig. 7, p. 524, traduit clairement cette conception. Cette coupe est dirigée du SW au NE, par le Magenhorn, le Hübschhorn et le Monte Leone (c'est-à-dire, en réalité, parallèlement à l'axe des plis). Et M. *Schmidt* nous y montre des plis énergiquement déversés au NE, auxquels il attribue des charnières synclinales fermées en profondeur au SW.

Pour la commodité du lecteur, je rappelle que la Teggiolomulde de MM. *Schmidt* et *Preiswerk* est notre synclinal I—II, que la Veglia- et la Carneramulde sont des digitations synclinales de l'ensemble II—III, et que les Berisalschiefer ou Berisalgneisse dont M. *C. Schmidt* a enrichi la synonymie sont les Casannaschiefer de *Gerlach*, ou encore la zone du Grand Saint-Bernard au sens délimité par M. *A. Stella* en 1905.

Il est exact que la trace des nappes simploniques, dirigée au SW sur la rive droite de la Toce, se rapproche de la direction E-W en franchissant cette grande vallée à Crevola et environs, et qu'elle s'infléchit au NW dans la dépression du Simplon. La partie NE-SW de cette trace, sur la rive gauche de la Toce, est bien la racine relative des nappes simploniques. Mais la région des traces dirigées E-W, ou SE-NW, appartient déjà à la partie recouvrante de ces mêmes nappes, toutes couchées à l'extérieur de la chaîne. M. C. Schmidt voit, dans cette disposition curviligne du plan des traces, celle des racines et des plis eux-mêmes. Et la direction de poussée, toujours d'après M. C. Schmidt, varie en raison de l'inflexion des racines; elle passe donc graduellement du NW au N, pour devenir NE dans la région de Zwischbergen, du Laquinhorn et du Simplon. La structure de cette partie des Alpes Léponentines se résumerait en un vaste hémicycle ouvert au nord. Vers la région centrale, „südlich des Binnentalen“, la matière issue de ces racines curvilignes aurait dû converger de tout un quadrant de l'horizon. L'inflexion des racines et la déviation de la poussée atteindraient au moins 90°, et cela dans un territoire assez restreint. Voilà une anomalie singulière. A l'ouest du dispositif de M. C. Schmidt, les racines, dirigées SE-NW, se rapprocheraient très vite des fronts au voisinage du Rhône, et le savant bâlois en conclut que l'amplitude des plis couchés simploniques diminue rapidement vers l'ouest¹⁾.

Toutes ces choses sont bien intéressantes. Mais pour qu'elles fussent arrivées, il faudrait que M. C. Schmidt n'ait pas confondu la direction des couches avec celle des plis, ni la direction des plongements avec celle de la poussée.

Rien, au voisinage de la dépression du Simplon, ne nous oblige à admettre d'importantes perturbations dans l'allure longitudinale des plis couchés. Et nous pouvons en toute tranquillité faire l'économie des plis transversaux que M. C. Schmidt admet et dessine. Nous pouvons aussi ranger l'inflexion des racines et la rotation de la poussée, avec l'ampleur qu'on leur a attribuées, au rang des illusions d'optique.

Remarquons encore, avant de nous détourner des plis transversaux, que deux coupes de M. C. Schmidt, passant par le sommet du Monte Leone, sont tout à fait inconciliables. L'une²⁾ est la fig. 7, p. 524, déjà citée. L'autre est la coupe du grand tunnel, pl. 8. Il est impossible que le premier de ces profils ne soit pas faux. Il va du SW au NE et coupe le second, qui lui est perpendiculaire, sur la verticale du Monte Leone. Il s'en suit que cette verticale est commune aux deux profils. Sur le premier pourtant, les plis se ferment en travers, et sur le second ils se ferment en long. Cela est évidemment une impossibilité géométrique et mécanique.

Qu'un même pli considéré au même point de l'espace puisse être dirigé à la fois au NW et au NE, c'est inconcevable. Comment M. C. Schmidt s'y prend-il pour loger tout cela dans une région aussi limitée? J'ai renoncé depuis longtemps à me le représenter, car l'espace géométrique, tel que je le conçois, n'a malheureusement que trois dimensions.

L'allure plus ou moins transversale des zones tectoniques le long de la coupure du Simplon, et au delà vers Zwischbergen, Arza, Prestino, Prabernardo et le Colle Selarioli s'explique tout simplement par la sortie axiale oblique, vers le nord-est, d'un ensemble de plis couchés au voisinage de l'horizontale et affectés de diverses ondulations. Mes stéréogrammes font comprendre pourquoi cette trace superficielle d'un phénomène profond est plus ou moins transversale.

Et pour qu'on pût affirmer l'existence d'un maximum d'amplitude des plis-nappes I, II et III sur la ligne Crevola—Mörel, il faudrait d'abord prouver que cette valeur diminue vers l'ouest. Cela n'est pas possible actuellement, encore que M. C. Schmidt ait soutenu le contraire. Rien n'empêche de se représenter que les nappes d'Antigorio, du Lebendun et du Monte Leone se prolongent très loin sous le Valais central et occidental, et même au-delà. Elles y sont simplement recouvertes par la nappe du Grand Saint-Bernard, qui les déborde très largement vers l'extérieur

¹⁾ Le maximum de cette amplitude se trouverait, d'après M. C. Schmidt, sur la ligne de poussée Crevola—Mörel, c'est-à-dire beaucoup plus à l'est.

²⁾ Variante dans Erläuterungen zur geol. Karte der Simplongruppe. Zürich, 1908, fig. 4, p. 47. — Ibidem, les trois coupes fig. 5, p. 56, avec leur profusion de plis transversaux, montrent la difficulté du problème.

de la chaîne, ainsi que le montre la rapide avancée de la trace du flanc renversé IV sur la rive gauche de la Viège et jusque dans les parages de Sion. Le pli de Visperterbinen, digitation inférieure de la nappe IV, et le pli du Gebidem, tête frontale III, s'enfoncent en direction axiale vers l'ouest ou à peu près, sous cette partie débordante de la nappe IV. Ces deux têtes de plis, notablement déjetées au Nord, se projettent fort loin en avant des gneiss de Ganter (III) et du bord externe de la cuillère du Bortelhorn (IV), dont l'attitude est balancée autour de la verticale, et qui se relie à la partie avançante du dispositif, Gebidem et Visperterbinen, par un double genou très marqué. Le fait que les têtes frontales du Gebidem et de Visperterbinen se projettent aussi loin en avant du reste des nappes simploniques n'avait pas été mis en lumière jusqu'ici, et mes stéréogrammes donnent une image simplifiée de ce phénomène.

Nous ne pouvons rien savoir des changements de profil transversal, de direction axiale et d'amplitude auxquels est soumise la prolongation profonde, occidentale, des nappes I, II et III sous la nappe du Saint-Bernard. L'idée d'un maximum de cette amplitude sur la ligne Crevola—Mörel ne me paraît donc pas s'imposer dès maintenant.

L'amplitude du recouvrement IV, si ce phénomène était limité à la trace Visperterbinen—Arza, comme on l'a souvent cru, serait un peu inférieure à 25 kilomètres, mesurés dans le sens de poussée SE-NW. En réalité, cette amplitude est au moins double, et cela tient au fait, mis en lumière par les présentes recherches, que la trace du recouvrement se peut poursuivre plus loin, aussi bien vers l'extérieur que vers l'intérieur des Alpes.

1° Prolongement extérieur du recouvrement IV. Dans la région frontale IV à l'ouest de Viège, vers Rarogne, Gampel, Turtmann et Agaren, la direction moyenne des plis (ESE à SE) ne se confond pas avec celle des traces (E-W), mais pénètre obliquement sous le bloc montagneux de la rive gauche du Rhône, c'est-à-dire sous la nappe du Saint-Bernard. Il en résulte que le bord frontal de celle-ci, vers Chippis et Sion, appartient à une région bien plus antérieure du profil que le même bord pris à Stalden ou à Turtmann. Le massif de l'Aar et les plis de sa couverture helvétique, au N. de Rarogne (Raron), descendent au sud-ouest en direction axiale, plus encore qu'à l'ouest : par suite, leur prolongation souterraine, bien loin de passer toute entière au nord du Rhône, passe principalement au sud, et doit être considérée comme largement chevauchée non seulement par les carapaces helvétiques, mais encore par la zone de Sion, la zone carbonifère et celle du Saint-Bernard. C'est sous Vissoye et Evolène que je me représente la suite des plis helvétiques de Rarogne et de la partie sous-jacente du massif de l'Aar. La prolongation de ce dernier doit passer en arrière du massif du Mont Blanc, et je crois qu'elle forme l'infrastructure profonde des grandes vallées latérales de la rive gauche du Rhône valaisan, jusqu'assez loin vers l'intérieur des Alpes. Grâce à l'abaissement du massif de l'Aar vers le sud-ouest, et du Mont Blanc vers le nord-est, le front de la nappe IV a pu décrire cette énorme protrusion, comparable à une hernie, dans l'espace de moindre résistance compris entre les deux massifs-obstacles. Chacun sait que ce phénomène se traduit en plan par une incurvation de toutes les zones extérieures des Alpes Pennines, avec convexité tournée vers le dehors de la chaîne.

2° Prolongement intérieur du recouvrement IV. D'après mes constatations, le Trias de l'Alpe d'Arza se continue au sud, avec plongement dominant vers l'ouest et le nord-ouest. Il atteint le thalweg du Val Bognanco très peu en aval du pont de Prestino, où aucune carte ne l'indique. Il y comprend au moins des quartzites, des dolomies et des schistes noirs, le tout visible au bord même de la route carrossable. Il se continue vers la crête de partage du côté de la vallée d'Antrona, franchit cette dernière près de San Pietro et de Prabernardo et se manifeste encore jusqu'un peu au-delà du Colle Selarioli, sur le versant d'Anzasca. Sauf perturbations très locales, il descend constamment à l'ouest et au sud-ouest en direction axiale sous la partie amincie de la nappe IV (P^{te} Veros—Camughero—Cianghin) et la fait flotter. Cette mince bande mésozoïque, partiellement reconnue par *Gerlach*, ne figure pas comme telle sur la nouvelle carte italienne au 400,000^e. Personne jusqu'ici n'a montré ses relations avec Arza et sa signification véritable. Grâce à elle, le recouvrement IV gagne 11 nouveaux kilomètres mesurés dans le sens de poussée vers l'intérieur de la chaîne.

3° Amplitude minimum de la nappe IV. Il n'est pas toujours possible, dans la protrusion des plis frontaux IV à l'ouest de Turtmann, de faire la part de ce qui revient à la simple déviation des traces et à celle, moins importante du reste, qui atteint les plis au sud de Loèche. L'obstacle du massif de l'Aar s'étant abaissé, il y a bien une légère déflexion des plis, qui passent localement à la direction WNW, grâce à l'entraînement de la matière au bord est de la région d'écoulement facile. En projetant sur la direction de poussée dominante, SE-NW, la seule distance Turtmann-Selarioli, on reste donc certainement au-dessous de la réalité, et on échappe au reproche d'exagération. Ainsi mesurée, l'amplitude du recouvrement IV est de cinquante kilomètres au moins. Sur la transversale de Sion, cette amplitude, augmentée d'une partie de la protrusion, atteint peut-être 60 kilomètres, si elle ne les dépasse. Ce recouvrement fait flotter non seulement les schistes de Casanna, mais toute la zone carbonifère avec ses complications. Si l'on pouvait, par un artifice quelconque, enlever le mésozoïque de la zone de Sion et celui du synclinal III—IV, Turtmann-Selarioli, on verrait la zone carbonifère dite axiale suspendue sur le vide, comme une mince corniche à l'extrême bord d'un balcon.

* * *

Les idées de M. C. Schmidt sur le dôme autochtone, sur le „horst“ du Mont Rose, ne soutiennent pas davantage l'examen. Ce savant, analysant en 1907 l'interprétation proposée et motivée deux ans auparavant par MM. Lugeon et Argand, s'exprimait comme suit¹⁾: „Nach M. Lugeon ist der Monte Rosa ebenso eine „Nappe“ wie die Dent Blanche Die Gneisssschichten sind im ganzen domförmig gelagert. Im Norden wird das Massiv begrenzt durch die Mulde Bognanco-Zwischbergen-Saas-Zermatt. Die Westgrenze bilden im Challant-Tal die unter der Dent Blanche-Masse hervortauchenden Schiefer der Zinalmulde, die nun nach Westen umbiegen und am Südfuss des Massivs die Alagnamulde bilden, welche Stella bis nach Bannio im Val Anzasca verfolgt hat. Nach Lugeon wären alle diese mesozoischen Schiefer im Umkreise des Massivs als „Fenster“ zu deuten. Dem widerspricht nun die Tatsache, dass, wie die Profile auf Taf. 8 zeigen, die Schiefer den Gneissen aufliegen und nicht wie das im Umkreis der Dent Blanche-Masse der Fall ist, dieselben unterteufen. Eine Überkippung der Monte Rosagneisse über die Grenzmulde kenne ich nur bei Antrona am Ostende des Massivs (Fig. 3, Taf. 9). Ich bemerke noch, dass in der nordöstlichen Ecke des Massivs im Hintergrund des Val Bognanco eine kleine Teilmulde von der Hauptgrenzmulde sich abzweigt, die gegen Südwesten bis ins Furgtal südlich Saas sich verfolgen lässt, eine Synklinalzone im Massiv bezeichnend²⁾ (Fig. 1, Taf. 9). Sämtliche Schieferzonen im Umkreis des Monte Rosa betrachte ich als in Gneiss eintauchende, synklinal gestellte Muldenteile, deren Wurzel die hochliegende, erodierte, durch die Dent Blanchedecke einst übergelagerte Zinalmulde ist.“ M. C. Schmidt admet donc bien l'autochtonie des gneiss du Mont Rose³⁾, et compare ce massif, ainsi que celui du Grand Paradis, à des piliers (Pfeiler)⁴⁾ ou à des horsts⁵⁾ restés debout après l'affaissement de régions voisines.

Ces développements sont accompagnés d'une abondante illustration⁶⁾.

¹⁾ C. Schmidt. Über die Geologie des Simplongebietes und die Tektonik der Schweizeralpen. Eclogæ geol. Helv. 1907, IX, 4, p. 557.

²⁾ Note infrapaginale de M. C. Schmidt, ibidem: „Die Marmore und Grünschiefer am Sonnighorn im Furgtal (Fig. 1 und 3, Taf. 9) werden von Gneiss unterteuft. Der Behauptung von Lugeon und Argand: „Dans le Furggental apparaît, d'après Gerlach, une petite fenêtre mésozoïque sous le gneiss du Mont Rose“ kann ich nicht beistimmen. A. Stella opponiert ebenfalls gegen diese unrichtige Interpretation der Angaben von H. Gerlach.

³⁾ loc. cit., p. 580.

⁴⁾ loc. cit., p. 581.

⁵⁾ Erläuterungen zur geol. Karte der Simplongruppe. Zürich 1908, p. 55.

⁶⁾ Dôme autochtone du Mont Rose: Eclogæ 1907, IX, 4, pl. 9, fig. 1, 2 et 3; pl. 12, fig. 5. — Erläuterungen zur geol. Karte der Simplongruppe, pl. 5, fig. 1, 2 et 3. — Überkippung bei Antrona, avec plis transversaux: Führer zu den Exkursionen der Deutschen geolog. Gesellschaft. Basel, August 1907, Cliché 73. — Voir aussi Erläuterungen, fig. 5, p. 56.

MM. *Lugeon* et *Argand*, on pourra s'en convaincre en relisant leurs notes de 1905, n'ont jamais prétendu que les gneiss du Mont Rose fussent en recouvrement sur leur ceinture externe mésozoïque, visible dans les vallées de Saas, de Zermatt, de Challant ou d'Alagna. MM. *Lugeon* et *Argand* sont peu enclins à confondre les flancs normaux avec les flancs renversés. Le plongement périclinal du Mont Rose sous le Mésozoïque, dans la moitié occidentale du massif, est un fait si notoire depuis les recherches de *Gerlach*, que nous l'avons supposé connu du lecteur, et ne l'avons même pas mentionné, parce qu'il ne joue aucun rôle dans ce que nous avons à dire. Pour prouver l'existence d'une nappe, ce n'est pas le flanc normal qu'il faut montrer; ce qui importe en première ligne, c'est le flanc renversé et le substratum récent. Voilà pourquoi, en 1905, MM. *Lugeon* et *Argand* ont fait voir qu'à son extrémité nord-est, le gneiss du Mont Rose flotte sur le synclinal qui occupe la partie supérieure des vallées de Zwischbergen, Bognanco et Antrona; que ce phénomène est dû au relèvement de l'axe des plis vers le nord-est; qu'au delà du synclinal précité, la nappe du Mont Rose est entièrement décapée par l'érosion; que dans le Furggental apparaît, d'après *Gerlach*, une petite fenêtre mésozoïque sous les gneiss du Mont Rose; que la racine, encore en parfaite continuité avec la nappe, rejoint par Bannio le gneiss du Tessin, et qu'enfin elle est localement renversée vers l'intérieur de la chaîne.

Si le synclinal de Furggen se fermait en bas dans les gneiss du Mont Rose, comme M. C. *Schmidt* l'a dessiné après la publication de nos résultats de 1905, il ne pourrait confluer, à l'est, avec la cuillère mésozoïque de Bognanco, ce qu'il fait pourtant. Il devrait au contraire, ce qui n'a pas lieu, se prolonger au sud-ouest et se continuer, sans interruption des traces, dans la couverture mésozoïque normale du massif. Le plongement périclinal si régulier du flanc normal devrait être interrompu quelque part, pour que cette confluence pût s'opérer. Et cela n'irait pas sans de fortes perturbations de ce plongement. Mais ni les documents existants, ni les observations que j'ai faites sur le terrain, avant et après la publication de ces critiques, ne montrent rien de pareil. De plus, pour que le synclinal Furggen-Sonnighorn-Val Loranco pût se continuer en haut dans la couverture normale du massif, il faudrait qu'il ne fût pas affecté de cette magnifique charnière de Trias calcaire, convexe vers le haut, que j'ai observée dans la paroi sud du Sonnighorn, versant italien. Le dôme autochtone du Mont Rose et les relations du synclinal de Furggen avec la couverture mésozoïque du massif, tels que les dessine M. C. *Schmidt*, n'existent pas dans la nature.

Quant à l'„Überkipfung bei Antrona“, c'est bien autre chose. Ici M. C. *Schmidt* a pris pour un phénomène de tectonique locale, pour un pli transversal, ce qui me paraît être un trait de la tectonique générale, auquel j'attribue la plus haute importance.

Mes stéréogrammes font voir que c'est la sortie axiale du substratum mésozoïque de la nappe V, qui remonte des profondeurs du sud-ouest et après un long parcours souterrain, devient enfin visible au jour. Cette interprétation, outre qu'elle est d'un certain prix pour l'intelligence des Alpes franco-italiennes, a l'avantage de rendre superflu le pli transversal de M. C. *Schmidt* et de faire régner, à la place de l'exception, la loi de mieux en mieux confirmée du déversement unilatéral. La direction plus ou moins méridienne et subtransversale qui prévaut dans la branche mésozoïque d'Antrona et dans la partie limitrophe des gneiss IV et V est celle des traces et non pas celle des plis. Elle résulte de simples phénomènes d'intersection, et mes stéréogrammes montrent comment.

Ils montrent aussi, en résumant et en expliquant les observations que je fais sur le terrain depuis neuf années, que les nappes du Mont Rose et du Grand-Saint-Bernard existent réellement, quoi qu'on en ait dit ¹⁾.

Je reviendrai prochainement sur les objections intéressantes que M. *Stella* ²⁾ a développées en 1906 contre notre manière d'interpréter la bande de Furggen.

¹⁾ *S. Franchi*. Sulla tettonica della zona del Piemonte. Boll. R. Com. Geol., ser. 4^a, vol. VII, p. 118—145, 1906.

²⁾ *A. Stella*. Sui calcescisti della Valle di Furggen et sui gneiss di M. Emilius e M. Rafrè. Boll. Soc. Geol. Ital. XXV, 1906, fasc. I.

Et quant au massif de Camughero, mes stéréogrammes font voir qu'il s'enfonce au SW, en direction axiale, sous la branche d'Antrona du synclinal IV—V, tandis qu'il flotte, en direction axiale aussi, sur le synclinal III—IV, Arza—Selarioli, tout le long de son périmètre. Il faut donc bien admettre que le massif de Camughero appartient à une grande masse de recouvrement, la nappe IV, encore que M. *Franchi*¹⁾, en 1906, ait jugé inacceptable cette interprétation donnée par nous en 1905.

Les objections que M. *C. Schmidt* a cru élever contre l'existence des nappes du Saint-Bernard et du Mont Rose, comme aussi les idées de ce savant sur l'existence de plis transversaux et sur l'extinction des plis-nappes du Simplon vers l'ouest, dérivent d'une source commune. Une persistante erreur de diagnostic traverse tout cela.

Elle consiste à prendre la direction des couches, qui est celle des traces des plis, pour celle des plis eux-mêmes. Il est facile de montrer que ces éléments deviennent identiques seulement au cas où les couches sont verticales, et qu'en toute autre position des structures parallèles, surtout quand il s'agit de plis couchés et non plus de simples plis déjetés, il y a lieu de distinguer soigneusement entre le plongement rapporté à l'horizontale du lieu, tel que le donne l'observation brute, et l'inclinaison des couches rapportée à l'axe du pli.

En commettant ces erreurs, on n'a fait que perpétuer, sur un terrain nouveau, une confusion dont l'histoire de notre science montre le plein épanouissement il y a dix ou vingt ans. Il n'en est que plus intéressant de constater, dans la science actuelle, la survivance de pareilles méthodes.

Leur application nous ramène à l'époque où l'on croyait voir, dans la trace des nappes préalpines le long de la vallée de l'Arve, l'indice de plis transversaux marchant au sud; ou encore, le long de la grande sortie axiale du Prättigau et de l'Oberhalbstein, la preuve de cheminements vers l'ouest, combinés avec d'importantes incurvations de la direction des plis. Mais elle ne prouve rien contre l'existence des nappes du Saint-Bernard et du Mont Rose.

Elles existent, ces deux grandes nappes encore attachées à leurs racines, en dépit des obstacles fragiles et artificiels qu'on a voulu dresser en travers de leur continuité. La grande sortie axiale des Alpes Pennines, qui démontre si heureusement leur existence, est une région de dissection *optimum*, un pays privilégié entre beaucoup. Les nappes IV et V n'y sont ni aussi complètement enfouies que dans les Alpes franco-italiennes, ni aussi complètement détruites qu'au-dessus du Tessin. Toutefois, il ne faudrait pas en conclure que les recouvrements IV et V soient un phénomène spécial à cette région. Si nous les y voyons mieux qu'ailleurs, cela tient surtout, comme j'aime à me le représenter, au stade favorable atteint par l'érosion dans ce pays, et non à une localisation étroite des plis couchés. Au point de vue de la diagnose du tectonicien, la surface topographique est une section quelconque pratiquée dans des plis couchés doués d'une certaine continuité, et la région privilégiée résulte simplement d'un rapport favorable et transitoire entre l'altitude de la topographie et celle des plans axiaux.

Ce qui est localisé, ce n'est donc pas le phénomène des grands plis couchés, mais celui de leur dissection optimum.

* * *

Notre tâche est maintenant d'esquisser, en traits préliminaires que nous compléterons bientôt, le mode de continuité des nappes IV et V vers l'orient, au-dessus du Tessin et dans les Grisons, puis vers le sud-ouest, le sud et le sud-est, à travers les Alpes franco-italiennes, jusqu'à la Méditerranée.

A l'est du Simplon, les nappes pennines IV, V et VI, par la prolongation détruite de leur partie couchée, participent à l'ascension générale des axes vers l'orient, à leur culmination dans ce bombement transversal tessinois que nous avons signalé en 1905, enfin à leur retombée vers

¹⁾ *S. Franchi*, loc. cit., p. 138.

l'est dans les Grisons. Je n'ai pas manqué¹⁾, en 1906, de faire voir que les trois grands plis couchés de l'Adula, du Tambo et de la Suretta correspondent aux nappes piémontaises-pennines, et que leurs traces se font vis-à-vis de part et d'autre de la culmination des axes dans le Tessin. Et poussant l'application de ce principe dans le détail, j'ai montré que le pli de la Suretta représentée en partie au moins celui de la Dent Blanche.

Plus tard, M. *Schardt* a pressé davantage cette question de l'homologie entre les plis couchés penniques et grisons²⁾, et a proposé successivement deux solutions hypothétiques. Toutefois, l'hypothèse de travail qui me paraît le mieux satisfaire aux conditions géométriques du problème, en l'état actuel de la science, consiste à admettre que les parties couchées des plis se continuaient comme suit par dessus le Tessin :

Dent Blanche	VI	Suretta,
Mont Rose	V	Tambo.
Grand-Saint-Bernard	IV	Adula.

La trilogie grisonne serait la prolongation pure et simple, unité par unité, de la trilogie pennique. Ou plutôt c'est un seul et même objet tridigité³⁾, dont la continuité est presque entièrement détruite, et ne s'établit plus que par un étroit faisceau de racines balancées autour de la verticale à travers l'Ossola⁴⁾, la partie méridionale des gneiss tessinois autour de Locarno et de Bellinzona⁵⁾ et les environs de Chiavenna.

Je ne tarderai pas à revenir sur les arguments qui militent en faveur des homologies hypothétiques formulées plus haut, sans oublier les réserves qu'un tel sujet comporte.

Dans l'ensemble des nappes penniques, I à VI, il y a peut-être opportunité à pratiquer une coupure basée sur certaines différences de style tectonique, et qui se pourrait justifier, au besoin, par des faits d'un autre ordre.

Le groupe inférieur, simplio-tessinois, comprend, au nord du faisceau radical IV-VI, la majeure partie des gneiss du Tessin avec les lobes du Molare et de Campolungo, ainsi que les plis couchés du Simplon III, II, I et le granite de Verampio.

Le groupe supérieur, c'est la trilogie des nappes IV, V et VI, et c'est aussi de beaucoup le phénomène principal, pour autant que nous pouvons juger d'après ce que l'érosion nous a découvert. La quantité de matière mise en jeu dans ces trois grandes nappes est énorme. Par unité de longueur de la chaîne, elle équivaut à 6 ou 8 fois celle de la partie couchée des plis-nappes simploniques, et 6 à 8 fois aussi tout ce qui nous reste des nappes helvétiques et pré-alpines ensemble. A lui seul, le cube de matière intéressé par ces trois nappes est triple ou quadruple de celui de toutes les autres nappes alpines visibles sur le même profil transversal. Ces chiffres, qui sont basés sur des constructions à l'échelle, de prochaine publication, suffisent à montrer que nous sommes ici au siège principal de la force et qu'on ne peut parler de „synthèse“ des nappes alpines aussi longtemps que les trois quarts du phénomène sont encore contestés.

* * *

Et si les nappes IV et V se continuaient en l'air au-dessus du Tessin, il me paraît bien clair qu'elles se continuent aussi, plus ou moins enfouies, dans les Alpes franco-italiennes, avec de simples changements graduels de profil transversal, de direction axiale et d'amplitude.

¹⁾ *E. Argand*. C. R. Acad. Sc. 12 mars 1906.

²⁾ *H. Schardt*. Die modernen Anschauungen über den Bau und die Entstehung des Alpengebirges. Verhandl. schweizer. naturf. Ges., St. Gallen 1906, p. 308—346, pl. I et II.

H. Schardt. Les vues modernes sur la tectonique et l'origine de la chaîne des Alpes. Arch. sc. phys. et nat. Genève, XXIII, p. 356—385 et 483—496, carte et pl.

H. Schardt. Géologie de la Suisse. Extrait de „La Suisse“. Neuchâtel 1908. Pl. 22, 23 et 24.

³⁾ Digitations mineures mises à part.

⁴⁾ Voir nos trois planches.

⁵⁾ La nécessité de cette jonction par les racines, dont nous avons précédemment indiqué l'amorce occidentale (Camughero IV et Bannio V), a été parfaitement mise en lumière par M. *Schardt*, loc. cit.

„La zone carbonifère dite axiale“, c'est „le faisceau des digitations externes de la nappe IV“, comme je l'ai dit en 1906¹⁾. Et puisque ce passage ne contient aucune réserve locale, c'est bien de toute la zone carbonifère principale qu'il s'agit, du Valais à Savone en passant par la vallée d'Aoste, la Tarentaise, la Maurienne, le Briançonnais, les Alpes Cottiennes et Maritimes.

La zone permo-carbonifère, au total, c'est le front digité du noyau paléozoïque de la nappe IV, avec les portions adjacentes du flanc normal et du flanc renversé. Par suite de l'intersection très oblique de tout cela avec la topographie, le flanc renversé de la zone carbonifère prédomine en surface dans les limites de mes stéréogrammes, avec des digitations répétées et des enroulements très-complexes que l'échelle employée m'oblige à schématiser fortement.

Au contraire, dans la région franco-italienne, la prépondérance en surface appartient au front et au flanc normal, par suite de l'enfouissement beaucoup plus complet du solide structural. Les plis frontaux du Briançonnais, déversés à l'extérieur de l'arc, sont des digitations frontales de la nappe IV; ils se continuent avec des caractères analogues jusqu'en Valais d'une part, et de l'autre jusqu'un peu au N. d'Albenga en Ligurie, où ils atteignent la mer. Les plis en retour qui, un peu en arrière de la zone à déversement externe prédominant, donnent naissance à la structure en éventail, sont de simples complications du flanc normal IV.

Pour passer du déversement unilatéral qui prévaut sur le territoire de mes stéréogrammes à la structure en éventail qui règne dans les Alpes franco-italiennes, il n'y a qu'à bosseler le flanc normal IV de quelques plis en retour. Il n'est pas nécessaire de s'éloigner beaucoup dans cette direction pour trouver cette structure réalisée. Elle est déjà parfaitement développée dans le Valais occidental, vallées de Bagnes et d'Hérémence, comme le montre la carte tectonique pl. I. Personne ne songera à mettre en doute que le synclinal III-IV, Turtmann-Selarioli, n'existe en profondeur au-dessous de ces plis en retour, et ne rejoigne en avant la zone du Val-Ferret, à laquelle sa trace se relie évidemment en surface par Turtmann, Agaren, Sierre, Sion et Riddes. Car un synclinal couché de 50 kilomètres d'amplitude ne peut s'atténuer rapidement en direction axiale. Mais l'éventail de Bagnes, c'est l'éventail franco-italien, ou tout au moins un rappel septentrional de cette structure, intéressant du reste la même zone tectonique.

Il me semble donc établi, pour la première fois et en Valais, qu'une zone de plis en éventail, homologue de celle qui prévaut dans les Alpes franco-italiennes, mais bien moins enfouie, flotte dans toute sa largeur et jusque bien en arrière des plis en retour, sur des terrains mésozoïques.

L'idée que la structure en éventail comporte nécessairement l'autochtonie est une des plus enracinées qui soient.

Mais puisque les relations que je viens d'indiquer existent, on admettra aisément que la structure en éventail n'apporte à elle seule aucun argument pour ou contre la présence d'un substratum récent en profondeur; qu'elle se concilie très bien avec la première alternative, qui se démontre parfois, et bien avec la deuxième, qui ne se démontre pas.

* * *

La répercussion des faits acquis dans les Alpes Pennines sur le problème des Alpes franco-italiennes est inévitable, comme M. *Termier* l'a dit²⁾, et comme je l'ai esquissé³⁾ il y a quatre ans, à propos de la zone axiale.

L'histoire des recouvrements intra-alpins dans les Alpes françaises, depuis le jour où MM. *Kilian* et *Haug* en ont montré les premières traces⁴⁾ dans l'Ubaye, en 1892, appartient pour ainsi dire toute entière au présent de notre science. Depuis 1899, on peut le dire sans paradoxe, elle

¹⁾ *E. Argand*. C. R. Acad. Sc., 26 mars 1906.

²⁾ *P. Termier*. Sur la nécessité d'une nouvelle interprétation de la tectonique des Alpes franco-italiennes. Bull. Soc. Géol. Fr., 4^e sér., t. VII, 1907, p. 174—189, et pl. IV et V.

³⁾ *E. Argand*, loc. cit.

⁴⁾ *W. Kilian* et *E. Haug*. Sur la constitution géologique de la vallée de l'Ubaye (Basses-Alpes). Bull. Soc. de statist. de l'Isère, 14 nov. 1892. — Notes de Géologie alpine, 2^e article. Trav. Labor. Géol. Grenoble, II (1893).

appartient même un peu à son avenir¹⁾. MM. *Termier* et *Kilian* ont largement disposé de cet avenir en soutenant, dans une belle et déjà classique discussion²⁾ prolongée jusqu'à nos jours, le premier que l'Eocène de la zone des Aiguilles d'Arves et le Mésozoïque briançonnais pénétrèrent fort loin, le second que ces terrains pénétrèrent moins loin, ou ne pénétrèrent pas en profondeur, vers l'est, sous la zone carbonifère dite axiale.

L'objet de cette discussion ne manquerait pas de gagner en consistance si l'on venait à montrer qu'il est réellement visible. Jusqu'ici cette condition n'a pas été remplie.

C'est là, si je suis bien averti, le point essentiel du débat dans sa phase actuelle. De la solution qu'on est en droit d'espérer dépend l'idée qu'on pourra se faire sur le substratum profond de la zone carbonifère, de la Vanoise, du Mont Pourri, en un mot de l'éventail des Alpes françaises. Peu de régions ont été disséquées avec un soin aussi attentif par les géologues, mais la nature, qui dispose des forces de l'érosion, semble avoir négligé d'en faire autant.

Les grands charriages de l'Embrunais et de l'Ubaye, reconnus par MM. *Kilian* et *Haug*³⁾, sont certes d'admirables phénomènes; ils nous font voir dans ses détails l'architecture intérieure du Flysch et du Mésozoïque briançonnais à la périphérie de l'arc intra-alpin. Mais leurs révélations n'atteignent pas le substratum profond de la zone carbonifère axiale. La prolongation de ces nappes au-dessus du Mercantour⁴⁾, admise par M. *Léon Bertrand*, me paraît aussi une hypothèse nécessaire. M. *Boussac* vient de montrer⁵⁾ quelle extension considérable il faut attribuer au même système de recouvrements en Ligurie, jusqu'à la Méditerranée. Ces résultats me conduisent à penser que les nappes de l'Embrunais et de l'Ubaye ont recouvert le massif du Mercantour beaucoup plus largement qu'on ne l'a dit jusqu'ici. Les écaillés empilées du Briançonnais⁶⁾ décrites par M. *Termier*, les longs plis couchés dessinés par M. *Kilian* à la coupure du Guil, les recouvrements partiels admis par M. *Franchi* en arrière du Mercantour⁷⁾ nous montrent bien que l'aile externe de l'éventail est un faisceau de plis couchés déversés vers la périphérie de l'arc. Mais jusqu'ici aucun de ces exemples n'a permis d'affirmer avec certitude ce qui se passe sous le corps principal de la zone carbonifère. Il est exact, comme l'a très justement dit M. *Kilian*, que l'évidence en faveur de l'enracinement lointain de la zone carbonifère continue à faire défaut dans les Alpes françaises. Mais cette évidence est fournie par les Alpes Pennines, et c'est ce que montre le présent travail.

Les bandes de Malm briançonnais pincées sous les schistes lustrés de la Grande Sassière et du vallon de la Leyse⁸⁾, les plis couchés mésozoïques qui ont recouvert tout ou partie du massif

¹⁾ *P. Termier*. Sur la structure du Briançonnais. C. R. Acad. Sc. 13 janvier 1899. — C. R. sommaire Soc. Géol. Fr., 6 février 1899. — Les nappes de recouvrement du Briançonnais. Bull. Soc. Géol. Fr., 3^e série, t. XXVII, p. 87.

²⁾ On trouvera un résumé de cette discussion, avec bibliographie, jusqu'en 1904, dans le tome I du grand ouvrage de MM. *Kilian* et *Révil*: Etudes géologiques dans les Alpes Occidentales. Contributions à la géologie des chaînes intérieures des Alpes françaises. Mémoires pour servir à l'explication de la carte géol. dét. de la France, Paris 1904.

³⁾ Pour une vue d'ensemble sur ces nappes de charriage, on consultera avec fruit l'article publié par M. *Emile Haug* dans la Revue Générale des sciences pures et appliquées du 30 décembre 1903 sous le titre: Les grands charriages de l'Embrunais et de l'Ubaye.

⁴⁾ *Léon Bertrand*. Sur l'extension originelle probable des nappes de charriage alpines dans les Alpes-Maritimes. Bull. Soc. Géol. Fr., 4^e sér., t. VIII, 1908, p. 136—143, 1 fig.

⁵⁾ *Jean Boussac*. Le Nummulitique de la zone du Flysch à l'est et au sud-est du Mercantour. C. R. Acad. Sc. 3 janvier 1910 (fig. 1).

⁶⁾ *Pierre Termier*. Les montagnes entre Briançon et Vallouise (Ecaillés briançonnaises, Terrains cristallins de l'Eychauda, massif de Pierre-Eyraud, etc.). Mém. pour servir à l'explication de la Carte géol. dét. de la France. Paris 1903.

⁷⁾ *S. Franchi*. Sulla tettonica della zona del Piemonte. Boll. R. Com. Geol. 1906.

⁸⁾ *W. Kilian*. Sur la „fenêtre“ du Plan-de-Nette et sur la géologie de la Haute-Tarentaise. C. R. Acad. Sc. 1^{er} oct. 1906. — *P. Termier* et *E. Haug* dans C. R. sommaire Soc. Géol. Fr., 4 mars 1907. — *W. Kilian*, ibidem, 18 mars 1907.

de la Vanoise¹⁾, la quatrième écaïlle de M. *Termier*²⁾ sont des phénomènes du plus haut intérêt, mais ils se passent au-dessus de la zone carbonifère dite axiale et ne témoignent, ainsi qu'on l'a déjà dit, ni pour ni contre l'existence d'un substratum récent de cette dernière en profondeur.

Et pourtant les raisons développées par M. *Termier* depuis 1899 en faveur de ce phénomène invisible se sentent aisément, si elles ne se démontrent pas. Des phénomènes tels que les charriages de l'Embrunais et de l'Ubaye ou les écaïlles mésozoïques du front briançonnais me paraissent difficilement concevables sans un entraînement tangentiel important des formations carbonifères qui leur servent de noyau anticlinal en arrière.

Les objections de M. *Kilian*, très nombreuses et abondamment documentées, ont pu paraître insurmontables à beaucoup de bons esprits. Parmi les plus frappantes, je dois signaler dès maintenant :

1° La faible profondeur attribuée au synclinal des Aiguilles d'Arves.

2° La solidarité complète qui existe, d'après M. *Kilian*, entre le massif du Pelvoux, l'Eocène de la zone des Aiguilles d'Arves, le Mésozoïque, le Carbonifère briançonnais et sa couverture de quartzites du Trias, de Trias calcaire et de schistes lustrés au contact interne, vers la zone du Piémont. Tout cet ensemble étant stratigraphiquement solidaire, ne pourrait avoir été le siège de grands déplacements relatifs.

3° L'identité qui existe, notamment près de Moutiers, d'Aigueblanche et des Chapieux (Savoie) entre les faciès du Lias et du Trias de part et d'autre de la bande synclinale éogène (des Aiguilles d'Arves) ne se peut concilier avec l'idée de mouvements différentiels de grande amplitude.

Il en est de même de la présence constatée de formes de transition entre les faciès de divers termes du Mésozoïque briançonnais et dauphinois.

4° L'existence, dans le Val Ferret italien, de passages verticaux ménagés entre les divers groupes du Jurassique dauphinois et intra-alpin distingués par MM. *Franchi*, *Kilian* et *P. Lory*³⁾ s'opposerait également à la possibilité de tels mouvements.

Des objections aussi positives, portant contre une théorie dont le critère est invisible dans les limites des Alpes françaises, ne pouvaient manquer d'en balancer un instant la fortune.

Une circonstance me semble, plus que tout autre, montrer la grande difficulté de résoudre ce problème au moyen des seules Alpes françaises. C'est que *Marcel Bertrand*, dans cet admirable mémoire⁴⁾ de 1894 où il établissait ou confirmait l'âge mésozoïque des schistes lustrés, la structure en éventail et tant d'autres choses, n'a fait aucune hypothèse sur le substratum profond de la zone axiale, et cela à une époque où il avait entièrement mûri la théorie des nappes de recouvrement. Il est permis de penser qu'il n'eût pas manqué d'y faire au moins une allusion, si les phénomènes tectoniques de surface lui avaient fourni des indices dans ce sens.

En réalité, le problème des charriages français intra-alpins a évolué, jusqu'en 1905, presque indépendamment de celui des recouvrements de la même zone en Suisse. On connaissait deux régions, deux centres principaux de nappes intra-alpines : d'une part, celui du Simplon et du sud-ouest des Grisons, de l'autre, celui du Briançonnais et de l'Ubaye. Leur coordination, quelquefois tentée, n'avait pas abouti. La région orientale, simplonique, manquait de contact avec la région méridionale, briançonnaise. Les différences de faciès introduisaient, et introduisent encore une difficulté appréciable dans l'établissement de raccords à longue distance.

¹⁾ *Paul Lemoine*. Quelques observations sur le bord nord du massif de la Vanoise. Bull. Soc. Géol. Fr., 4^e sér., t. VI, p. 423, 1906. *E. Haug* et *W. Kilian* in C. R. sommaire Soc. Géol. Fr. 25 juin 1906. *E. Haug*, ibidem, 4 mars 1907. — *P. Termier*. Sur la nécessité d'une nouvelle interprétation de la tectonique des Alpes franco-italiennes, loc. cit.

²⁾ *Pierre Termier*. Les montagnes entre Briançon et Vallouise, loc. cit.

³⁾ *S. Franchi*, *W. Kilian* et *P. Lory*. Sur les rapports des schistes lustrés avec les faciès dauphinois et briançonnais du Lias. Bull. Serv. Carte géol. Fr., XVIII, n° 119 (1907—1908).

⁴⁾ *Marcel Bertrand*. Etudes dans les Alpes françaises. Structure en éventail, massifs amygdaloïdes et métamorphisme. Bull. Soc. géol. Fr., 3^e sér., t. XXII, p. 69—162, 4 pl., 1894.

Un autre obstacle, très considérable celui-là, était que la structure profonde du bloc intermédiaire, Alpes Pennines et Graies, était pour ainsi dire inconnue, et avait été à peine effleurée en des hypothèses justes mais invérifiées.

Les esprits avertis sentaient bien qu'un raccord s'imposerait tôt ou tard, mais cette énorme lacune de nos connaissances apparaissait comme un vide de 8000 kilomètres carrés et ne permettait pas d'aborder le problème avec fruit.

Du jour où la tectonique des Alpes Pennines a pu sembler éclaircie, où les grandes nappes du nord faisaient effort pour pénétrer en France par le Col de Rhème et y pénétraient effectivement par la zone carbonifère, en pleine région de l'éventail, un pont était jeté et la jonction établie.

Un autre pont, ou si l'on préfère, un tunnel, était pratiqué dans une zone plus interne, du Mont Rose au Grand Paradis. Mais celui-là, dont nous nous occuperons tout à l'heure, ne débouche pas sur le Briançonnais, et ne commande que l'arrière-pays de ce dernier.

Préparée par la découverte des nappes pennines et graies, amorcée, de plus, par le rattachement de la zone carbonifère „axiale“ à la nappe IV, une interprétation nouvelle de la tectonique des Alpes franco-italiennes s'imposait en partant du nord, et M. *Termier* en a montré la nécessité¹⁾.

Les divergences qui subsistent aujourd'hui ne sont pas fondamentales, et proviennent de ce que M. *Termier*, établissant la continuité par une voie intérieure²⁾, zone carbonifère-Grand Paradis-Mont Rose, voit dans le premier de ces massifs l'équivalent de notre nappe V, tandis que, profitant de la voie extérieure qui a l'avantage d'être visiblement continue en surface, j'y reconnais depuis 1906 celui de la nappe IV, ou nappe du Grand Saint-Bernard³⁾.

Il n'en reste pas moins que l'impossibilité de montrer actuellement le substratum de la zone carbonifère, dans les Alpes françaises, subsiste dans son entier. Fort heureusement, cette unité tectonique se continue en Valais. Elle pénètre sur le territoire de mes stéréogrammes, et ceux-ci font voir, avec beaucoup de simplifications nécessitées par l'échelle, qu'elle s'engage dans le flanc renversé de la nappe IV et s'y réduit à un mince liseré, replié, multidigité, et énergiquement laminé entre les schistes de Casanna au-dessus et le synclinal Turtmann-Selarioli au-dessous. Une approximation plus complète, basée sur mes levés à grande échelle, ne tardera pas à préciser les détails de ce phénomène.

Le sort du Carbonifère est intimement associé à celui des schistes de Casanna, qui se relie à lui, ainsi qu'aux quartzites du Trias, par des transitions lithologiques et stratigraphiques ménagées, verticalement et latéralement⁴⁾. Les quartzites du Trias et le Carbonifère ne sont qu'un faciès local, différencié en niveaux, de la série pennique inférieure, tandis que les schistes de Casanna appartiennent à son type compréhensif, suivant l'heureuse expression de M. *Termier*.

¹⁾ *P. Termier*. Sur la nécessité d'une nouvelle interprétation de la tectonique des Alpes franco-italiennes, ante.

²⁾ Ibidem.

³⁾ Les trois planches annexées au présent travail font voir que la branche synclinale d'Antrona, substratum mésozoïque de la nappe du Mont Rose et du Grand Paradis, ne peut se continuer sous la zone carbonifère dite axiale, mais appartient à un niveau tectonique plus élevé.

⁴⁾ *H. Gerlach* a signalé en 1871 déjà les passages verticaux ménagés qui existent, dans le Valais occidental et la vallée d'Aoste, entre la zone carbonifère et celle des „schistes de Casanna“. Ces Matériaux, ancienne série, 9^e liv. Das südwestliche Wallis, von H. Gerlach, 1871. P. 96—114. MM. *W. Kilian* et *P. Lory* ont dessiné ces alternances au col de la Payannaz, sur la crête de partage Bagnes-Entremont. Bull. Serv. Carte géol. Fr. n° 110, t. XVI (C. R. Collab., 1905), fig. 2. Je les ai constatées sur presque tous les points où le contact entre les deux formations est visible. Aucune limite tranchée n'y existe, pas plus du reste qu'entre les terrains analogues du massif de la Vanoise et environs, décrits en 1890 par M. *Termier*.

Pour les passages verticaux et latéraux des quartzites du Trias inférieur aux schistes de Casanna, et pour les passages verticaux du Trias calcaire au même complexe, voir : *E. Argand*, L'exploration géologique des Alpes Pennines centrales. Bull. Soc. Vaud. sc. nat. XLV, 1909. 1 pl. Pour un schéma de ces relations stratigraphiques, consulter la légende de cette dernière planche.

Ces relations intimes des schistes de Casanna montrent que leur partie haute monte jusque dans le Trias inférieur, comme je l'ai indiqué l'année dernière, et ne peut être considérée comme „jungarchaisch“, encore que M. *C. Schmidt* l'ait affirmé pour le complexe tout entier.

Mais pour le tectonicien, et aussi longtemps qu'il s'agit de la grosse anatomie, tout cela est un seul et même objet. C'est la nappe du Grand-Saint-Bernard, qui jouit de la fonction anticlinale par rapport au Trias calcaire et au Jurassique de la zone de Sion, et par rapport à ceux de la zone du Combin.

A l'est du synclinal III—IV, Turtmann-Selarioli, il ne reste rien de ce grand ensemble, sinon une étroite racine de gneiss dans l'Ossola. Tout le reste, schistes de Casanna, Carbonifère et quartzites briançonnais, se continuait dans les airs au-dessus de l'extrémité sud-ouest du massif de l'Aar, au-dessus des trois nappes simploniques, au-dessus du Tessin. Si des changements longitudinaux de faciès n'interviennent pas en route, on peut espérer en trouver la suite dans le pli couché de l'Adula.

Le synclinal Turtmann-Selarioli, qui fait flotter tout cela en direction axiale, c'est le substratum visible de la zone carbonifère et de toute la nappe IV, dont les schistes de Casanna sont surtout le noyau anticlinal à faciès métamorphique. L'amplitude de ce synclinal est d'au moins 50 kilomètres, et celle de la nappe IV est d'autant. Les Alpes Pennines montrent au grand jour ce que les Alpes françaises cachent trop bien.

La montée axiale vers l'est explique ce fait surprenant. Comme par une plaie ouverte, le contenu du synclinal longtemps enfoui en profondeur, depuis la Méditerranée sans doute, sous les Alpes Maritimes, Cottiennes, Graies et Pennines occidentales, apparaît enfin au jour sur le territoire de mes stéréogrammes, dans les Alpes Pennines centrales et orientales.

Et s'il est une chose qui ne se peut oublier, c'est la prescience hardie dont M. *Termier* a témoigné en 1899, en osant concevoir une hypothèse qui ne se peut démontrer qu'aujourd'hui, et à deux cents kilomètres de la région visée par ce savant.

Il est difficile de savoir quelles variations d'amplitude subit cet immense recouvrement dans sa prolongation souterraine jusqu'à la Rivière du Ponent, mais la persistance des digitations frontales IV, déversées à l'extérieur de l'arc à travers le Valais, la vallée d'Aoste, la Savoie, le Briançonnais, les Alpes Cottiennes et Maritimes, jusqu'un peu au N. d'Albenga, où elles atteignent la mer, montre suffisamment que le phénomène se manifeste sur plus de 400 kilomètres de longueur, et empêche de chercher les extrémités libres, ou tout autre mode de terminaison de la nappe du Grand-Saint-Bernard sur le continent.

Et quant aux plis en retour qui se développent en dedans de l'„axe“, ce sont, pour la plupart, de simples perturbations du flanc normal IV, comme je l'ai déjà indiqué.

Les nappes éogènes de l'Embrunais et de l'Ubaye, leur prolongation disparue sur le Mercantour (et sans doute aussi sur le Pelvoux), leur continuation visible, d'après M. *Boussac*, dans une partie de l'Eogène ligure, sont l'enveloppe, les boucles frontales et le substratum tertiaires de la nappe IV, et peut-être aussi l'enveloppe d'unités plus profondes. On peut en dire autant de la partie haute de la zone synclinale des Aiguilles d'Arves.

Le synclinal Turtmann-Selarioli, c'est le substratum qu'on verrait sous les Alpes françaises si elles étaient moins enfouies; c'est l'objet matériel propre à soulever pour longtemps le Mont Pourri, la Vanoise, et à fortiori la zone carbonifère, dont la fuite dans les airs, à l'est des Alpes Pennines, est seule vraiment „axiale“.

Et je ne crois pas me tromper en comparant les 400 kilomètres de la zone carbonifère à une position à peu près inexpugnable de front, mais dont une des ailes, beaucoup plus vulnérable, vient de succomber au prix d'un mouvement tournant de 50 kilomètres.

Comme d'autre part les objections de M. *Kilian* subsistent et s'appuyent très évidemment sur des faits, il n'est pas inutile de montrer comment ces derniers se peuvent concilier avec la manière de voir que je défends. Je ne puis m'arrêter ici qu'aux aspects tout à fait généraux, et ne tarderai pas à revenir avec plus de détail sur cet objet.

1° La faible profondeur du synclinal des Aiguilles d'Arves, à supposer même qu'elle soit tout à fait établie, se concilie facilement avec la pénétration lointaine du Mésozoïque briançonnais sous le Carbonifère, parce que les boucles emboîtées d'un même pli, ou paquet de plis couchés n'ont pas nécessairement la même amplitude dans les divers terrains dont se compose un même em-

boîtement. Un exemple saisissant de ce phénomène, signalé depuis longtemps par *Marcel Bertrand* et *M. Ritter*¹⁾, c'est le faible déversement des synclinaux du flysch d'Arches, à la coupure de l'Arve, alors que les boucles correspondantes du Jurassique, au nord de Sallanches et dans le Mont Joly, sont couchées sur de nombreux kilomètres.

2° Il y a, en effet, beaucoup de choses solidaires entre le Pelvoux et les schistes lustrés de la zone du Piémont. La base du synclinal des Aiguilles d'Arves s'appuie bien en repos normal sur le Pelvoux, comme l'a dit *M. Kilian*. La partie haute de la même zone, avec tout le reste jusqu'à la zone du Piémont, est bien un tout solidaire ou à peu près. Mais il est moins sûr que la base du „synclinal“ des Aiguilles d'Arves soit solidaire avec le sommet de la même zone, et pour ma part, je n'en crois rien. Comment penser que ce flysch n'est pas lui-même affecté de recouvrements complexes, Eocène sur Eocène, la base seule étant en repos normal sur le Pelvoux? Pour qu'il en fût autrement, il faudrait au moins que les nappes de l'Embrunais, où cette multiplication du flysch est attestée par des lames nombreuses et répétées de Mésozoïque intercalées à diverses hauteurs, fussent inexistantes. Et comment croire que les racines relatives de l'Embrunais, qui sont certainement multiples et nourrissent des charriages de 30 à 40 kilomètres d'amplitude minimum, puissent, en se prolongeant derrière le Pelvoux, passer à une série simplement redoublée *après quelques kilomètres seulement de continuité axiale*? Quelle inflexion rentrante n'auraient pas dû, dans ce cas, décrire les fronts des nappes embrunaises pour passer aussi vite derrière le Pelvoux?

Je n'ignore pas que plusieurs savants ont voulu voir dans la direction transversale qui prévaut immédiatement au sud du Pelvoux l'indice de plis en travers. Sans vouloir du reste nier que la marche des nappes embrunaises ait été influencée, ou que leurs fronts aient été un peu déviés par ce massif, je crois que cette allure subtransversale, avec plongements accentués vers le sud ou le sud-est, est essentiellement celle des traces et non celle des plis. Et si cela est, il faut bien que les nappes de l'Embrunais se soient continuées vers le nord, au-dessus du Pelvoux, comme elles le faisaient au-dessus du Mercantour. Le fait que la base de l'Eocène est en repos normal sur plusieurs points de la bordure du Pelvoux ne s'oppose pas plus à la provenance lointaine du Carbonifère et des boucles mésozoïques frontales du Briançonnais, que l'existence du Flysch des Alpes suisses, autochtone par sa base, n'empêche la partie haute du même terrain de participer aux charriages helvétiques.

3° L'existence de formes de passage entre certains termes mésozoïques dauphinois et briançonnais est très intéressante, parce qu'elle montre, à mon avis, que les zones de sédimentation ne sont pas strictement parallèles aux zones tectoniques.

Mais la continuité stratigraphique, basée sur la matière, ne s'oppose en rien à la continuité tectonique, basée sur la forme. Ce sont des choses différentes, partiellement obliques l'une par rapport à l'autre. Il n'y a aucune raison, même si la pénétration du Mésozoïque briançonnais à l'Est est très lointaine, pour que son passage au faciès dauphinois se fasse partout et toujours dans des régions à jamais cachées à nos yeux. L'obliquité des zones stratigraphiques, ou le morcellement plus ou moins marqué des domaines isopiques peuvent très bien ramener des fragments de ce passage dans la région accessible à l'observation, sans que la profondeur du synclinal couché III—IV, visible et mesurable dans les Alpes Pennines, ait à en souffrir sous la Tarentaise, la Maurienne ou le Briançonnais.

Les stratigraphes des Alpes occidentales attribuent avec raison une valeur de premier ordre à la distinction de la zone du Briançonnais et de la zone du Piémont, encore qu'elles soient reliées par des passages latéraux ménagés, et que la première soit surtout le faciès normal et différencié en niveaux, la seconde le faciès métamorphique et plus ou moins compréhensif d'un même ensemble solidaire.

¹⁾ Voir notamment la planche III de *M. E. Ritter* dans: La bordure sud-ouest du Mont Blanc, les plis couchés du Mont Joly et de ses attaches. Bull. Serv. Carte Géol. Fr. n° 60, IX, 1898.

Et pourtant ces deux zones stratigraphiques du premier ordre passent l'une à l'autre, non pas à la limite de deux grandes nappes, mais sur la carapace, sur le flanc normal du pli couché IV. Il est difficile de trouver dans les Alpes un exemple plus saisissant d'indépendance relative entre la paléogéographie et la géométrie des nappes. Toutefois, cette indépendance n'est pas complète, et nous y reviendrons. Elle suffit cependant à montrer que la liaison entre une nappe et un ensemble de faciès déterminés, bien que souvent vérifiée, ne l'est pas toujours ni nécessairement, et que ce principe a été prématurément et trop rigoureusement généralisé. Pour beaucoup de savants, cette dépendance nécessaire entre les nappes et les faciès s'impose aujourd'hui comme un axiome a priori, encore qu'elle résulte d'inductions basées a posteriori sur des faits d'observation. Je crois avoir montré que ce principe, malgré sa haute valeur pour la diagnose de beaucoup de nappes alpines, ne s'étend pas à toutes, que son emploi comporte certaines réserves et qu'il demeure, au total, à peu près vrai entre certaines limites.

Si le Lias et le Trias présentent en diverses régions de la Savoie le même faciès de part et d'autre de la zone des Aiguilles d'Arves, cela ne s'oppose en rien à la possibilité d'une pénétration profonde et lointaine du Mésozoïque à l'est. Cela peut s'accorder avec la faible profondeur attribuée au synclinal des Aiguilles d'Arves, laquelle, comme nous l'avons vu, ne prouve rien par elle-même contre la grande pénétration du paquet synclinal mésozoïque qui l'enveloppe et l'emboîte en arrière.

Cet exemple confirme le fait que les domaines isopiques sont souvent à cheval sur les zones tectoniques, ou ce qui revient au même, qu'un même pli ou paquet de plis, pendant son développement, ne reste pas nécessairement confiné dans une région de faciès déterminée.

Il montre aussi l'opportunité qu'il y a, en certains cas, à reconnaître d'abord les formes structurales, en partant d'un certain minimum de stratigraphie, puis de les dérouler pour savoir, autant que faire se peut, comment la matière étudiée en détail par le stratigraphe se répartit dans les formes reconnues par le tectonicien.

Si l'adage en vertu duquel chaque nappe se distingue nécessairement et partout par des faciès particuliers est entré dans les habitudes d'esprit de beaucoup de savants, il ne s'ensuit pas qu'il soit toujours vrai, comme je l'ai montré tout à l'heure. Et sa réciproque est sujette aux mêmes restrictions. Si le tectonicien peut établir que deux zones de même faciès ont éprouvé d'importants mouvements différentiels, le stratigraphe pourra profiter de cette constatation; il pourra, en effectuant le déroulement des plis couchés, acquérir des vues plus complètes sur la forme véritable des domaines isopiques et apprécier leur irrégularité.

Et si le faciès dauphinois pénètre un peu dans le domaine de la nappe IV, ou le faciès briançonnais dans l'avant-pays de cette nappe, cela ne s'oppose en rien à la continuité des objets structuraux qui passent à travers tout cela. Le Mésozoïque qui fait suite au bord interne de la zone des Aiguilles d'Arves, qu'on le prenne en Savoie ou ailleurs, se continue dans la zone du Val Ferret; et la zone du Val Ferret, c'est le synclinal Turtmann-Selarioli avec ses 50 kilomètres de pénétration minimum.

4° L'existence de passages verticaux ménagés entre les divers groupes, plus ou moins isoclinaux, du Jurassique dauphinois et intra-alpin en Val Ferret, si elle se pouvait établir définitivement, s'opposerait sans doute à l'existence de mouvements différentiels discontinus, avec grande amplitude. Elle exclurait la possibilité de nappes dont le flanc renversé serait totalement supprimé. Mais elle ne ferait pas obstacle à l'existence de nappes à flanc renversé partiellement conservé. Un passage stratigraphique aminci reste un passage stratigraphique, et le mouvement différentiel, même très considérable, se répartit alors non plus sur une surface unique, mais dans une tranche douée d'épaisseur.

J'ai fait voir, l'année dernière, que cette réserve s'applique à la nappe de la Dent Blanche; il en est de même pour les flancs renversés de la nappe du Mont Rose dans les vallées d'Antrona et de Furggen, et pour celui de la nappe du Saint-Bernard en divers points du synclinal Turtmann-Selarioli. C'est, du reste, le mode de recouvrement qui prévaut dans toutes les nappes de la zone pennique, des Grisons à la mer. La liaison nécessaire qui existe, pour plusieurs savants,

entre la notion de nappe et celle de discontinuité basale unique, nous paraît purement verbale, et nous comprenons sous le terme de nappes de recouvrement ou de charriage, toutes les formes du phénomène tangentiel qui se traduisent par de grandes amplitudes. Par leur force linguistique, les termes de nappe, de recouvrement, de charriage n'impliquent, malgré les images statiques ou dynamiques qu'ils suggèrent, aucune hypothèse sur la nature de la dislocation basale, qu'elle soit un flanc renversé aminci, supprimé, ou encore une simple surface de poussée sans relation génétique avec un pli couché antérieur. Les plis couchés à flanc renversé incomplètement supprimé sont pour nous un cas particulier, relativement peu évolué, du phénomène plus général des nappes. Et si, en 1905, M. *Lugeon* et moi nous sommes servis de ce terme général au lieu de celui de plis couchés, ou de plis-nappes, c'est parce que nous ne jugions pas urgent de faire telle ou telle hypothèse particulière sur la nature du contact inférieur des nappes pennines.

* * *

La grande sortie axiale des nappes IV et V, dans les Alpes Pennines orientales, commande toutes les Alpes Franco-italiennes intérieures, jusqu'à la mer, à peu près comme celle du Prättigau et de l'Oberhalbstein commande les Alpes Orientales jusqu'à Vienne.

Je viens de montrer, en quelques traits trop rapides, ce qu'on est en droit de penser de la nappe IV jusqu'à Albenga et Savone. Voyons maintenant pour la nappe V¹⁾.

La branche mésozoïque d'Antrona descend à l'ouest et au sud-ouest, en direction axiale, sous la partie couchée de la nappe du Mont Rose. Elle fait flotter cette dernière, et du même coup en démontre l'existence. Il est difficile de penser que ce synclinal, et par suite aussi l'anticlinal couché sur lui, ne se prolongent pas au loin en profondeur.

En admettant, il y a cinq ans, l'existence du synclinal d'Antrona sous le Grand-Paradis, nous n'avons fait qu'appliquer le principe de continuité axiale. Personne ne contestera sérieusement que la „coupole“ du Grand-Paradis ne prolonge le flanc normal du Mont Rose, et que ces deux objets ne soient le même, continu en profondeur sous les masses mésozoïques de la vallée d'Aoste moyenne. Penser que la zone synclinale de la Grivola, homologue de la branche de Saas de mes stéréogrammes, se recourbe en profondeur sous le bord externe du Grand-Paradis, et que cette partie recourbée, moins invisible peut-être qu'on ne le pense, est l'homologue de la branche d'Antrona, ce n'est pas, en un certain sens, faire une hypothèse supplémentaire. Les parties visibles du couple tectonique Grand Paradis-Valsavaranche ressemblent trop à celles du couple homologue Mont Rose-Mischabel pour qu'on puisse rejeter sans examen l'hypothèse que les parties profondes et *cachées* du premier ressemblent essentiellement aux parties profondes et *visibles* du second.

L'encapuchonnement des plis frontaux du Portjengrat et du Latelhorn par le pli en retour des Mischabelhörner trahit évidemment une lutte pour l'espace, survenue à de grandes profondeurs entre les deux nappes, dans un milieu étroitement confiné où les possibilités d'écoulement étaient restreintes. Dans ce duel gigantesque, le Mont Rose a été la partie attaquante, le Saint-Bernard la partie résistante. La nappe V, ayant esquissé trop tard son mouvement principal vers l'extérieur, s'est efforcée de déloger le premier occupant.

La nappe IV s'y est prêtée dans la mesure du possible, et non sans éprouver de sévères déformations. La matière de cette nappe, énergiquement laminée sous la sole du Mont Rose et sous le synclinal d'Antrona, dans ce qui est maintenant le massif de Camughero, s'est beaucoup amincie, et a flué vers l'avant, pour s'accumuler dans des régions moins comprimées, et former ainsi, avec une épaisseur tectonique du 8 à 10 kilomètres, l'énorme pli en retour du Weissmies et des Mischabelhörner.

¹⁾ On consultera utilement la Carta geologica delle Alpi occidentali, au 1:400 000^e, publiée en 1908 par le R. Ufficio Geologico.

Ce phénomène, désigné par moi sous le nom d'encapuchonnement, montre comment des plis en retour peuvent prendre naissance sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir de vraies poussées vers l'Italie, des affaissements de l'arrière-pays ou de véritables décompressions¹⁾.

Et je crois aussi qu'il y aura lieu, dans toute théorie complète de l'éventail des Alpes franco-italiennes, de faire intervenir dans une notable mesure le mécanisme de l'encapuchonnement.

Le pli de Valsavaranche est couché en retour vers le Grand Paradis, comme l'a montré M. Novarese. Je continue à penser qu'il n'est qu'une réapparition lointaine et incomplètement disséquée du pli en retour des Mischabelhörner, comme le Grand Paradis est une réapparition lointaine et incomplètement disséquée de la nappe du Mont Rose. Je persiste aussi à admettre, en m'appuyant sur d'évidentes raisons de continuité axiale, d'homologie et de symétrie des traces, que les relations génétiques du pli de Valsavaranche et de la nappe du Grand Paradis sont les mêmes que celles du pli des Mischabelhörner et de la nappe du Mont Rose, que ces deux couples tectoniques sont le même, et que leurs deux profils transversaux ne diffèrent que par des particularités de second ordre.

La culmination localisée des axes sur la direction de poussée qui passe par l'obstacle du Mont Blanc ne se peut comparer au point de vue de l'ampleur verticale, à la montée axiale qui prévaut dans les Alpes Pennines, et c'est pour cela que le couple méridional est moins heureusement disséqué que celui du Nord.

Ici encore, la différence essentielle ne me paraît pas être dans les phénomènes tectoniques eux-mêmes, mais dans la manière dont l'érosion nous les présente.

* * *

Dans les Alpes Cottiennes²⁾, le massif Dora-Maira prolonge au sud le Mont Rose et le Grand Paradis, après une courte interruption des traces superficielles, due à la dépression tectonique des vallées du Lanzo. Cette dépression, comparable dans les grands traits à l'ensellement des

¹⁾ Aucun exemple alpin ne montre mieux quelle doit avoir été la genèse de beaucoup de plis en retour. Les relations géométriques du pli en retour des Mischabelhörner et de la nappe du Mont Rose sont disséquées jusque dans leur tréfonds, et c'est encore à l'élévation propice des plans axiaux que nous le devons. Dans les plis en retour des Alpes franco-italiennes, ces dernières profondeurs restent enfouies, et nous ne voyons guère que la surface du phénomène. Ici encore, les Alpes Pennines semblent appelées à fournir de véritables explications génétiques. Il n'y a pas eu, selon moi, de décompression importante; ce qui a prévalu, c'est une moindre compression des parties hautes du dispositif, l'effort orogénique demeurant, au total, dirigé vers l'extérieur des Alpes. Cette moindre compression était toute relative, puisque sa cause prochaine était une surcompression exercée à une plus grande profondeur et vers le nord par les plis frontaux du Mont Rose. C'est ainsi que l'apparente anomalie du plissement en retour se ramène à un cas particulier du déversement unilatéral. Le massif de Camughero est la tige amincie et couchée de tout l'éventail IV.

²⁾ Outre les travaux de B. Gastaldi, qui restent fondamentaux et où seule, jusqu'ici, la chronologie des terrains a notablement vieilli, on consultera avec fruit, pour le versant italien des Alpes Cottiennes:

D. Zaccagna. Sulla geologia delle Alpi Occidentali. Boll. R. Com. Geol. Italia, XVIII, p. 346, 1887.

C. F. Parona. Sulle rocce diasproïdi a radiolarie di Cesana presso il Monginevro. Rend. R. Ist. Lombardo, ser. 2^a, XXIV, 1891.

C. F. Parona. Sugli schisti silicei a radiolarie di Cesana presso il Monginevro. Atti R. Accad. Sc. Torino, XXVII, 1892.

M. Baretta. Geologia della provincia di Torino. 1 vol. 8° con atlante di 7 carte e 27 profili. Torino, Casanova, 1893.

Marcel Bertrand. Etudes dans les Alpes Françaises. Bull. Soc. Géol. Fr., 3^e sér. XXII, p. 69, 1894. (Traité aussi d'une partie du versant italien.)

S. Franchi. Notizie sopra alcune metamorfosi di eufotidi e diabasi nelle Alpi Occidentali. Boll. R. Com. Geol., XXVI, p. 181. 1895.

V. Novarese. Sul rilevamento geologico eseguito nel 1894 in valle della Germanasca (Alpi Cozie). Boll. R. Com. Geol., XXVI, p. 253. 1895.

A. Stella. Sul rilevamento geologico eseguito nel 1894 in Valle Varaita (Alpi Cozie). Boll. R. Com. Geol., XXVI, p. 283. 1895.

S. Franchi e V. Novarese. Appunti geologici e petrografici sui dintorni di Pinerolo. Boll. R. Com. Geol. XXVI, p. 385. 1895.

nappes signalé par MM. *Lugéon* et *Argand* dans la vallée d'Aoste moyenne, est moins étendue et accidentée de diverses perturbations. Elle est occupée surtout par des roches vertes mésozoïques.

Je n'ai passé que 70 jours dans le massif Dora-Maira, et ne puis prétendre le connaître mieux que les savants distingués qui en ont levé la carte.

Toutefois, les suggestions développées ici ont au moins l'avantage de s'appuyer sur des choses que j'ai vues.

Rien ne me paraît s'opposer à ce que le complexe supérieur de ce massif, celui qui surmonte la „zone graphitique“ de Pinerolo et de Giaveno, ne soit en recouvrement sur cette dernière, qu'on considère, avec une probabilité raisonnable, comme principalement carbonifère. L'existence de passages graduels au contact supérieur de la zone graphitique montre seulement qu'on a affaire à un pli couché ordinaire, à flanc renversé incomplètement supprimé. Je crois que ce pli couché appartient à la nappe V, et qu'il tient encore à sa racine par le nord du massif, autour de la retombée périclinale, compliquée d'importantes perturbations, que l'on constate dans cette région de l'„ellipsoïde“ Dora-Maira. La trace de cette racine atteint la plaine piémontaise auprès de Cumiana, et, au delà, elle se continue vers le sud, invisible sous les alluvions. A partir de la latitude de Pignerol, la retombée interne du massif fait défaut, et son plan est caché sous la plaine. Ce qui prévaut dans les vallées du Pellice, du Pô, de la Varaita et de la Maira, c'est la retombée externe du profil transversal de ce grand pli couché. Et je crois que cette retombée est formée de nombreuses digitations anticlinales plongeant vers la France, sous le bord interne de la zone mésozoïque centrale des Alpes Cottiennes, dite zone du Viso. Ces digitations sont séparées par des synclinaux mésozoïques pareillement plongeants, et pincés en concordance isoclinale dans les terrains anciens de cette retombée externe. Les calcschistes de Subiaschi en Val Pellice¹⁾ ne peuvent se raccorder à la zone du Viso par le haut; s'il en était ainsi, cette continuité laisserait inévitablement une trace visible, et la masse ancienne Monte Cornour-Monte Frioland serait entièrement séparée, en surface, de l'ellipsoïde principal. Il faut donc opérer le raccord par dessous, et cela ne peut se faire sans que la masse Cornour-Frioland flotte en profondeur à la manière d'un paquet anticlinal plongeant vers la France et marchant vers l'ouest. Ce phénomène de digitation du bord externe doit se répéter plusieurs fois, en replis superposés, à en juger d'après les intercalations de calcschistes, assez nombreuses, que j'ai vues en divers points des vallées du Pô et de la Varaita, près de la périphérie du massif, mais sans relation visible en surface avec la zone du Viso. On est en droit de penser que ces synclinaux retournés jouent, dans cette prolongation lointaine de la nappe V, le rôle du synclinal de Furggen dans le massif du Mont Rose.

Dans le tiers méridional du massif, les structures parallèles se recourbent graduellement, en passant de la direction sud au sud-est, puis à l'est et enfin au nord-est, le plongement se faisant toujours sentir vers l'extérieur de cette incurvation.

V. Novarese. Rilavamento geologico del 1895 nella Val Pellice (Alpi Cozie). Boll. R. Com. Geol., XXVII. 1896.

S. Franchi. Appunti geologici e petrografici sui monti di Bussoleno nel versante destro della Dora Riparia. Boll. R. Com. Geol., XXVIII, p. 3. 1897.

V. Novarese. I giacimenti di grafite delle Alpi Cozie. Boll. R. Com. Geol., XXIX, p. 4. 1898. (Con cartina.)

S. Franchi. Sull'età mesozoica della zona delle pietre verdi nelle Alpi Occidentali. Boll. R. Com. Geol., XXIX, p. 173—247, e pp. 325—482. 1898. (Con tavole ed una cartina geologica delle Alpi Cozie italiane.)

A. Stella. Calcari fossiliferi e scisti cristallini dei monti del Saluzzese, nel cosiddetto ellipsoide gneissico Dora-Maira. Boll. R. Com. Geol. XXX, p. 129. 1899.

S. Franchi. Ancora sull'età mesozoica della zona delle pietre verdi nelle Alpi Occidentali. Boll. R. Com. Geol. XXXV, p. 125. 1904.

S. Franchi. Sulla tettonica della zona del Piemonte. Boll. R. Com. Geol. XXXVII, p. 118. 1906.

Pierre Termier. Sur la nécessité d'une nouvelle interprétation de la tectonique des Alpes Franco-Italiennes. Bull. Soc. Géol. Fr., 4^e sér., VII, p. 174—189, et pl. IV et V. 1907.

Eduard Suess. Das Antlitz der Erde, Bd. III, 2. Hälfte. Wien und Leipzig 1909.

¹⁾ Signalés par M. *Novarese* (Val Pellice, loc. cit.).

L'hypothèse d'un recourbement des axes des plis, annonciateur d'extrémités libres, ne me paraît pas indispensable dans cette région, bien qu'on l'ait récemment suggérée. Cette disposition me paraît plutôt convenir aux traces, et résulter de l'intersection entre les structures parallèles bombées en travers, et la topographie. En un mot, c'est la retombée périclinale d'un paquet de plis couchés vers le sud-ouest, avec descente axiale au sud-est vers la plaine de Cuneo. Cette retombée, qui reste comparable à celle du Mont Rose sous l'ensellement de la vallée d'Aoste, en diffère par le plus grand nombre des digitations couchées, et par le fait que les alluvions de la grande plaine, au large de Busca et de Saluces, nous en cachent la partie interne, sans toutefois entamer le massif aussi loin vers l'avant que cela se produit, par exemple, à la hauteur de Torre Pellice.

La direction axiale d'ensemble du massif s'enfléchit bien du sud au sud-est, en passant des deux tiers septentrionaux au tiers méridional de l'„ellipsoïde“, mais ce léger recourbement n'est autre que celui de la chaîne toute entière.

Les zones graphitiques de Pinerolo et de Gaviengo sont pour moi un objet unique, dont la continuité est interrompue, ou sur le point de l'être, par des étirements ou autrement. Elles appartiennent très probablement, ainsi que leur substratum de gneiss granitique visible en deux régions limitées (Monte Freidour et Monte Bracco), au flanc normal IV, à moins qu'il ne s'agisse simplement d'une partie plus profonde du pli V.

Tout cet ensemble profond, zone graphitique et gneiss granitique, est accidenté, à la coupure du Chisone près de Meana, dans les montagnes au nord de Perosa Argentina et plus à l'est vers le Monte Freidour, d'un gros faisceau de plis transversaux, dirigés est-ouest ou à peu près, pourvus de charnières que j'ai dessinées en 1905, et incontestablement démontrés par des mesures de plongements que j'ai faites sur les points où les structures parallèles sont verticales, afin d'éviter toute confusion entre le plongement brut et le plongement rapporté aux axes, ou entre la direction des traces et celle des plis.

L'existence de ces plis transversaux fort accentués, et même légèrement déversés vers le sud, se concilie très bien, et sans paradoxe, avec la continuité axiale méridienne des grandes nappes: ce sont des replis intérieurs de ces dernières. Ils expriment le fait qu'à une certaine phase de l'avancée des nappes vers l'ouest, il s'est produit, par suite de décompositions locales des forces, une composante longitudinale de compression.

Les plis transversaux de ce type, beaucoup plus petits et plus accentués que les grands ensellements qui dépendent de la segmentation de la chaîne, ne sont pas rares dans les zones intérieures des Alpes Pennines, et je les ai retrouvés jusque dans la zone du Combin, où l'on ne contestera guère, je pense, la prépondérance du mouvement tangentiel unilatéral. De dimensions plus faibles que ceux du Val Chisone, ils se manifestent par un gondollement en replis transversaux presque indéfiniment répétés sur d'assez grandes surfaces dans la vallée de Bagnes (arêtes à l'est du Mont Avril).

Lorsque des replis transversaux, dûs à la composante longitudinale de compression, affectent le flanc renversé d'un pli couché en même temps que son substratum, il se produit de véritables tunnels transversaux ou subtransversaux, remplis de Mésozoïque, entourés et recouverts de terrains anciens. La fenêtre de Trias calcaire de l'Alpe Vingt-Huit (pl. I), constatée par moi en 1908 dans la vallée de Bagnes, en est un exemple.

Les complications qui accidentent la périphérie occidentale et méridionale du lambeau de recouvrement du Mont Emilius (nappe VI), entre le Col de Plan Fenêtre et la Pointe de Leppe, par la vallée de Comboë, l'Alpe et le col d'Arbole, le haut du cirque d'Arpisson sur Cogne, la Pointe Garin, la Tour Granson et l'Alpe de Cesere sont des tunnels subtransversaux plus au moins déformés au cours de leur histoire ultérieure¹⁾. De plus, la direction de ces curieux plis est curviligne en plan, et la concavité de cette giration s'ouvre au nord-est. C'est ainsi que je m'explique, après avoir visité ce terrain à diverses reprises depuis 1905, les perturbations qui affectent cette

¹⁾ Et fortement démantelés par l'érosion.

partie de la nappe VI, et ramènent localement la superposition normale en retournant le flanc renversé. Et cela ne va pas, du reste, sans des charnières bien visibles dans tout ce territoire.

Les analogies pétrographiques entre le massif du Mont Emilius et la zone Sesia-Lanzo, que je considère comme sa racine, portent sur un certain nombre de types lithologiques assez spéciaux, tels que micaschistes ou gneiss grenatifères à amphibole sodique, avec noyaux écolitiques souvent riches en omphacite. J'ai retrouvé les micaschistes et gneiss grenatifères à amphibole bleue dans la masse du Mont Rafrè, considérée par M. *Stella* comme mésozoïque et comme très différente de celle du Mont Emilius. Le plongement des gneiss du Rafrè sous le Mésozoïque, le long de leur bord sud-ouest, se peut expliquer par des dislocations subtransversales analogues à celles de la fenêtre de Vingt-Huit ou du Mont Emilius, et je ne manquerai pas d'aborder bientôt, dans son ensemble, l'exposé des motifs qui me font voir, ainsi que je l'ai annoncé déjà, dans les lambeaux de la Dent Blanche, du Mont Mary, du Pillonet, du Mont Emilius et du Mont Rafrè, les débris d'une grande masse de recouvrement digitée, la nappe VI, venue du sud-est et enracinée jadis dans la zone Sesia-Lanzo. Les différences de faciès qui existent entre certains termes pétrographiques appartenant à ces diverses masses sont tempérées et équilibrées par des analogies du même ordre, et prouvent que la distribution de la matière, qui est du reste antérieure à la production des plis, ne dépend pas des mêmes facteurs que la forme géométrique de ceux-ci.

* * *

Le fait que la partie interne de l'arc de recouvrement a souvent travaillé à la compression dans le sens longitudinal est d'un grand intérêt pour l'embryologie de la chaîne. Il s'accorde très bien avec l'idée d'une marche progressive des nappes vers l'extérieur de la courbe des Alpes occidentales. Aux stades antérieurs de leur développement, les plis-nappes devaient être moins incurvés en plan qu'ils ne le sont aujourd'hui. L'accentuation de la courbure, lentement poursuivie dans le temps, me semble due surtout à l'adaptation forcée des plis-nappes aux conditions restrictives imposées par l'infrastructure hercynienne, c'est-à-dire par les massifs de l'Aar, du Mont Blanc, du Pelvoux, du Mercantour, et par tout ce qui les réunit en profondeur. Ce sont des nappes forcées, tardivement assujetties à se déformer contre un obstacle relatif, beaucoup moins mobile qu'elles-mêmes.

En se perpétuant dans la durée, l'effort unilatéral a infligé de sévères déformations à ses œuvres antérieures, sans pourtant en effacer le caractère originel. Préparées dans un arrière-pays relativement éloigné des saillies de l'infrastructure, ce qui permettait une mobilité plus grande, une déformation plus régulière et une expansion plus libre, les nappes, dociles à l'effort longtemps prolongé, ont marché lentement vers l'avant et ont été comme embouties de vive force dans les inégalités et les niches de l'infrastructure. Celle-ci étant disposée, du massif de l'Aar au Mercantour, en un vaste hémicycle, il a bien fallu que les nappes s'adaptent graduellement à la forme de cet obstacle, en diminuant peu à peu le rayon de courbure de leur plan, au moins dans la région interne.

Nées trop grandes pour l'espace qui devait finalement les recevoir, les nappes ont utilisé cet excès local de matière pour la production de plis transversaux, spécialement nombreux et développés au côté interne de l'arc.

Les plis en retour de l'éventail ont eu une histoire hautement complexe, et il serait puéril de vouloir les expliquer par une seule cause prochaine. Mais leur genèse pourrait bien, en dernière analyse, se ramener à une même cause seconde : la continuation de l'effort unilatéral et ses décompositions locales, simultanées ou successives, dans le temps et dans l'espace.

Un de ces modes de décomposition, c'est l'encapuchonnement, et on lui doit le plus gros pli en retour des Alpes occidentales, celui des Mischabelhörner et du massif de Valsavaranche.

Que la structure en éventail de la zone „axiale“ IV, dans le reste des Alpes Graies, dans les Alpes Cottiennes et au-delà, soit due pour une part à des phénomènes du même ordre, cela me paraît hautement vraisemblable, et c'est encore dans les plis frontaux de la nappe V, Grand Paradis-Dora Maira, que je reconnais l'outil adéquate au travail accompli. Là aussi les mouvements

principaux de la nappe V ont été plus récents que ceux de la nappe IV. La surcompression exercée en profondeur, vers l'extérieur de la chaîne, par les plis frontaux V et leur enveloppe mésozoïque, s'est propagée jusqu'aux parties du flanc normal IV qui, par leur altitude relative et leurs conditions d'écoulement, pouvaient se prêter à une déformation en retour.

Cette explication a au moins l'avantage de réduire au minimum la part des causes exceptionnelles (efforts orogéniques dirigés vers l'Italie, décompressions et affaissements problématiques) qu'on a invoquées pour expliquer le phénomène de l'éventail.

D'autres plis en retour, tels que ceux dessinés par M. *Kilian* à la coupure du Guil, et certains autres que j'ai vus dans la vallée de Bagnes autour de Mauvoisin, sont remarquables par leur extrême amincissement, par la rigidité de leur forme vue en profil transversal, par leur hauteur bien supérieure à la largeur, et l'on est porté à croire qu'une composante longitudinale d'extension, une traction en long, a joué un certain rôle dans une certaine phase de leur histoire. La localisation des plis de ce type près de la périphérie de l'arc intra-alpin, et le développement favori des plis transversaux au côté interne de ce même arc, me paraissent indiquer qu'en certaines régions et à certains moments, les nappes de recouvrement des Alpes occidentales, en voie d'incurvation graduelle dans leur propre plan, ont travaillé à la manière d'une solive fléchie, c'est-à-dire à l'extension en dehors et à la compression en dedans.

Il y a beaucoup d'autres perturbations encore dans la partie incurvée des Alpes occidentales cristallines. Elles montrent que la tectonique en nappes, dans les chaînes curvilignes, n'est pas tout-à-fait la même que dans les chaînes droites, mais s'y ramène pourtant, et en dérive par une complication progressive des formes structurales, sous l'empire de conditions restrictives qui tiennent pour beaucoup à la forme particulière de l'infrastructure et de l'avant-pays.

Il peut suffire, pour le moment, d'avoir montré que des plis transversaux comme ceux du Val Chisone et du Mont Emilius, et que beaucoup de plis en retour sont réductibles au phénomène qui domine tout: le déversement unilatéral des plis-nappes.

Ils trouvent en lui une explication suffisante, et par leur subordination, attestent sa prépondérance.

La production de l'éventail ne peut guère avoir été postérieure à la mise en place dernière des nappes, et je pense plutôt qu'elle a eu lieu principalement en une phase tardive du phénomène total.

Toutes ces déformations si curieuses, qui diversifient la monotonie de la continuité axiale, mais n'en interrompent pas le cours, résultent du développement continu d'un même mécanisme, dans des conditions diverses et changeantes.

L'embryogénèse, l'accentuation et le déferlement des plis-nappes, la naissance de la segmentation transversale en bombements et ensellements, la croissance des protrusions frontales aux points faibles de l'infrastructure et de l'avant-pays, la production de plis transversaux et de plis en retour, sont les phases d'un même développement, et au total, c'est le même phénomène.

Que ces phases aient chevauché les unes sur les autres dans le temps, comme leurs produits se chevauchent aujourd'hui dans l'espace, cela est bien certain.

Le développement n'en a pas moins été continu, et son histoire, malgré les lacunes qu'elle nous présentera toujours, apparaît comme un tout.

* * *

Le renversement et l'amincissement des racines IV, V et VI dans les vallées d'Antrona et d'Anzasca, et au-delà vers l'est (pl. I, II et III) montre que l'avancée de l'arrière-pays vers le nord-ouest s'est perpétuée après la formation des plis couchés, et même après la formation du pli en retour des Mischabelhörner. Cette striction tardive, dans laquelle je vois la simple continuation de l'effort unilatéral antérieur, s'est propagée avec plus d'intensité aux grandes profondeurs que dans les régions moyennes et élevées. Elle a refoulé les parties basses du faisceau radical vers le nord-ouest, tandis que les parties hautes de ce même objet restaient en arrière, d'où le renversement des racines vers l'Italie.

L'aminçissement du faisceau radical me semble être, en partie, un résultat du même phénomène. La puissance primitive des racines me paraît avoir été ou plus grande, ou du même ordre de grandeur que celle des parties couchées, c'est-à-dire, pour les nappes du Saint-Bernard et du Mont Rose, de 4 à 5 fois au moins ce que nous constatons aujourd'hui. La matière des racines, soumise à la striction tardive, ne pouvait s'écouler aisément vers l'avant, gênée qu'elle était par les résistances intérieures du système V—IV déjà encapuchonné et par les résistances extérieures de la nappe IV contre le massif de l'Aar. Incapable du reste, par suite du confinement, de s'étaler beaucoup en longueur, cette matière a cédé vers la région de moindre résistance, c'est-à-dire vers le haut, en subissant un laminage sévère et un accroissement correspondant en hauteur.

Il serait bien difficile, si les racines primitives avaient été aussi minces qu'elles le sont aujourd'hui, de concevoir comment elles auraient pu, dans cet état, nourrir des nappes 4 à 5 fois plus puissantes, et comment le pli V, si faiblement alimenté, aurait pu fournir l'énorme travail que suppose la déformation par encapuchonnement dans un milieu très confiné. Ce travail eût été rendu plus difficile encore par la perte d'énergie résultant de la transmission des forces autour d'une voûte comme celle de Vanzone, si celle-ci avait réellement existé pendant l'encapuchonnement.

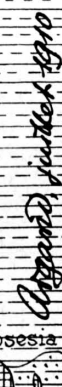
Tous ces indices, qui seraient déjà intéressants s'ils n'étaient qu'épars, me semblent acquérir, du fait de leur réunion dans un même objet structural, une portée plus haute. L'attitude sub-verticale des racines étant, dans sa forme actuelle, un phénomène secondaire, la question de leur attitude primitive demeure entière. Au total, et toutes réserves faites sur les difficultés d'un tel sujet, il me semble que le mode d'enracinement des plis couchés IV et V ne permet pas de les faire provenir de plis droits qui auraient chuté vers le nord. J'aime à me représenter que les racines primitives n'étaient pas nécessairement droites, que le plan axial des plis embryonnaires des nappes n'était pas inévitablement vertical, que pendant les phases initiales du développement, l'attitude des flancs normaux était déjà voisine de l'horizontale, et, que le plus reculé de ces flancs normaux se confondait, sans limite bien distincte, avec l'arrière-pays en mouvement. En se perpétuant, l'effort unilatéral a changé tout cela, mais c'est toujours cette cause prépondérante que nous retrouvons dans la diversité de ses effets.

• Errata.

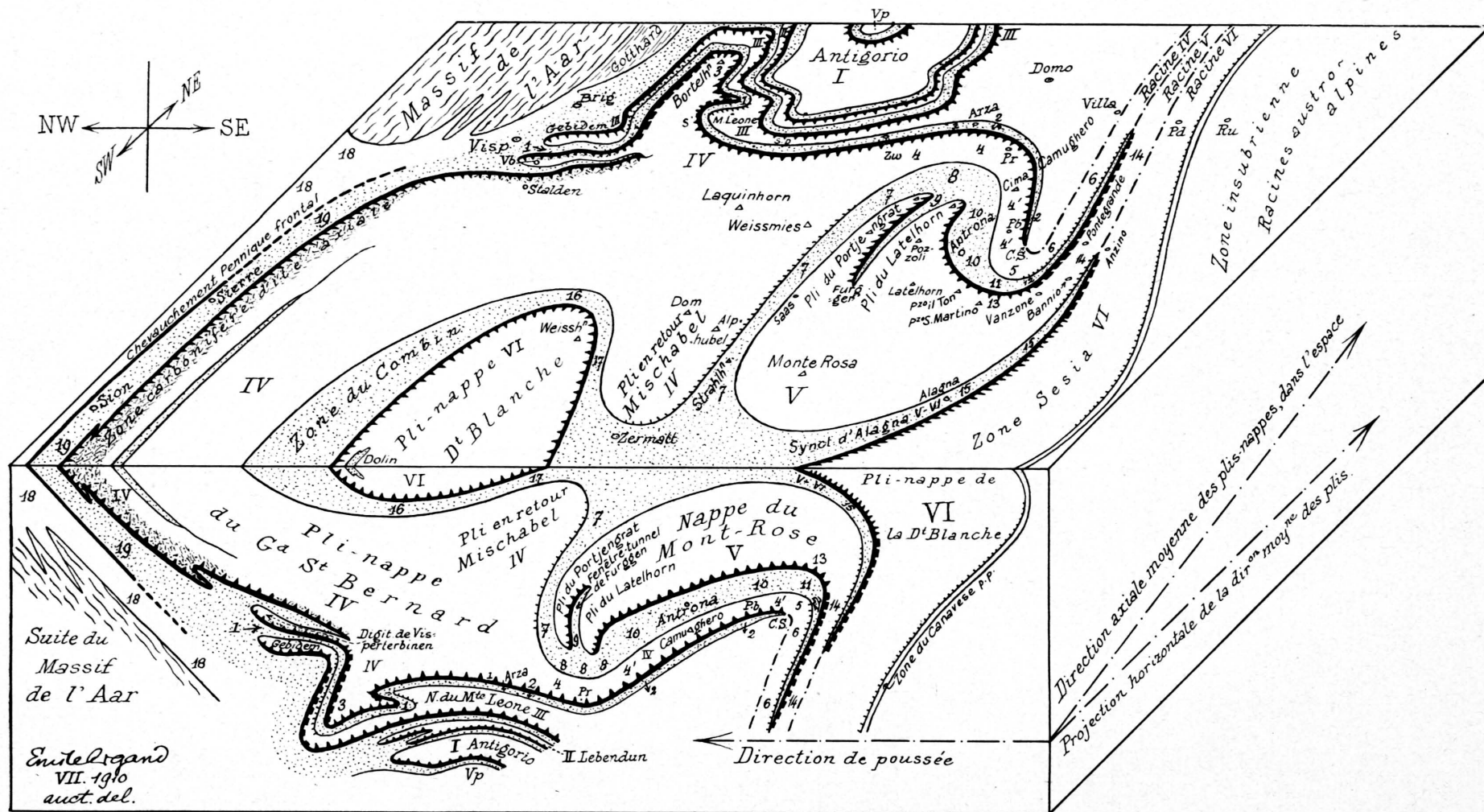
Page 3, ligne 36, au lieu de : par la, lire : par l'arête E de la.

Page 6, ligne 1, au lieu de : droite, lire : gauche.

Page 7, ligne 21, au lieu de : ESE à SE, lire : WSW à SW.



Carte tectonique des Alpes Pennines, par Emile Argand
(schématique).



Stereogramme schématique des Alpes Pennines,

montrant les principales relations entre la structure profonde et les phénomènes tectoniques de surface, par Emile Argand.



Stéréogramme tectonique des Alpes Pennines.

Les synclinaux de la zone pennique sont supposés vidés de leur contenu.