
MÉDITATIONS SUR LA TECTONIQUE

D'ÉCOULEMENT PAR GRAVITÉ¹

par Maurice GIGNOUX

(avec une planche hors texte)

SOMMAIRE :

- 1° Introduction.
- 2° La notion d'écoulement.
- 3° La notion d'écoulement par gravité.
- 4° La tectonique expérimentale.
- 5° Les notions de « temps géologique », de « solide » et de « liquide ».
- 6° Les courants magmatiques et les ondes d'intumescence.
- 7° Le problème des « zones de racines » ; les « zones de suction ».

1. — Introduction.

Voici un titre qui, pour des lecteurs géologues, n'a plus besoin d'être défini. Car les deux notions qu'il évoque, écoulement d'abord, écoulement par gravité ensuite, ont brusquement, au cours de ces dix dernières années, connu une fortune subite; on les voit de jour en jour appliquées ou discutées par des géologues de tous pays,

¹ La plupart des idées développées ici ont déjà été esquissées dans des publications antérieures (15, 17, 18, 19 et surtout 16); je les ai reprises dans cette nouvelle rédaction pour la rendre plus homogène et les présenter sous un point de vue nouveau; on verra en effet qu'en « méditant » longuement un sujet qui n'avait d'abord fait matière qu'à de brèves « réflexions » (titre de 16), j'ai été amené à critiquer et à préciser certaines notions restées un peu vagues et superficielles, en m'aidant surtout des deux importants mémoires cités sous les n^{os} 20 et 33 dans la liste bibliographique ci-jointe.

pour toutes sortes de régions plissées: Alpes, Jura (3, 28), Provence (5, 9), Apennin du Nord (10, 39), Ile d'Elbe (39), Maroc, Carpates (30, p. 82). Et quand les relations scientifiques auront un peu mûri, il sera curieux de voir quelles réactions cette théorie va susciter parmi les géologues des U. S. A. et de l'U. R. S. S.

Cette explosion soudaine rappelle singulièrement la vogue, la « mode » qui a autrefois brusquement consacré l'avènement de la théorie des nappes de charriage; à ce moment, chaque géologue s'efforçait de voir dans sa région un « pays de nappes ».

Mais, entre ces deux « modes », celle des nappes de charriage et celle de l'écoulement par gravité, il y a une grande différence. Car ce sont des observations positives qui ont conduit à la notion de nappe; cette notion s'est imposée dès que l'on a su dessiner des coupes géologiques précises, clairement visibles aux flancs de nos vallées de l'Ubaye, de la Durance, des Préalpes chablaisiennes et romandes, des Alpes de Glaris.

Au contraire, la fortune de la deuxième mode, celle de l'écoulement par gravité, n'est pas due à des observations nouvelles; et les géologues qui l'adoptent pour expliquer la genèse des nappes helvétiques et préalpines, des plis jurassiens et subalpins, n'ont apporté aucun changement aux coupes géologiques dessinées dans ces régions par leurs prédécesseurs. Beaucoup ont cru simplement découvrir dans ces coupes des « preuves » en faveur de la nouvelle théorie et se sont obstinés à en donner des « démonstrations » ingénieuses et subtiles.

Les mieux réussies de ces tentatives sont incontestablement celles de M. LUGEON et E. GAGNEBIN (30) pour les Préalpes, puis de E. GAGNEBIN (13) pour les nappes helvétiques de la Suisse orientale: on ne peut qu'admirer la merveilleuse virtuosité avec laquelle ces deux maîtres de la Géologie alpine nous montrent comment la théorie de l'écoulement par gravité permet de rendre compte des moindres détails de structure de ces régions qu'ils ont si minutieusement étudiées.

J'avoue que ces « démonstrations » ne m'ont pas paru absolument convaincantes; et je crois qu'il en serait de même pour toutes les tentatives analogues, qui, comme nous le verrons, laissent inconsciemment dans l'ombre le nœud de la question. Et de fait, on peut se demander pourquoi on aurait attendu si longtemps pour s'apercevoir que les coupes classiques des Préalpes et du Jura ne peuvent s'expliquer que si on fait intervenir la notion d'un écoulement par gravité; d'autant plus que depuis longtemps et de divers

côtés (AMPFERER, HAARMANN, SCHARDT, REYER, BOMBICCI, ANELLI, etc.)², des invitations en ce sens avaient été adressées au grand public géologique; nous aurons donc à rechercher pourquoi ces invitations avaient été, assez dédaigneusement, repoussées.

Il faut d'ailleurs bien distinguer, dans cette théorie, comme *deux étapes successives*.

La première, la notion d'écoulement, ne fait que traduire, dans un langage nouveau, des observations déjà faites depuis le début de la Tectonique. On se borne à décrire l'architecture actuelle des régions plissées: c'est de la « mécanique statique ». Et on se risque tout au plus à reconstituer les phases successives par lesquelles cette architecture s'est édifiée: c'est la « cinématique » des plissements, ou, si l'on veut, la reconstitution des « tectoniques embryonnaires », pour reprendre le langage d'E. ARGAND.

La deuxième étape, au contraire, est bien plus ambitieuse: elle vise à préciser les moteurs, les forces qui ont déformé et fait écouler les roches: c'est de la « dynamique ». Et l'on croit, au moins en certains cas, trouver ces forces dans la seule action de la gravité sur les masses rocheuses solides qui s'écoulent. Ainsi c'est surtout cette deuxième étape qui, au cours de ces dernières années, nous a apporté des idées nouvelles.

Pour le bien comprendre, nous allons analyser successivement ces deux étapes.

2. — La notion d'écoulement.

Plus ou moins explicitement exprimée, cette notion est, comme nous l'avons dit, déjà fort ancienne.

Toute *schistosité* suppose en effet un écoulement, et même un *écoulement différentiel*, par lequel des tranches empilées de la roche se déplacent les unes par rapport aux autres. L'épaisseur de ces tranches est extrêmement variable, depuis l'échelle « microscopique » jusqu'à l'échelle « géographique ».

C'est d'abord l'alignement des paillettes de minéraux phylliteux visibles dans les coupes minces. Puis c'est le « clivage schisteux » qui rend certaines roches comparables à une pile de feuilles de carton. Ce sont, à une plus grande échelle, les Bélemnites tronçonnées et les Ammonites déformées des schistes jurassiques et crétacés des Alpes. Ce sont enfin les mouvements différentiels qui se manifestent entre strates rocheuses de plasticité différente.

² Cet historique (voir 10 et 16) a été excellemment résumé par E. GAGNEBIN (13).

De plus en plus, on se rend compte de l'importance de ces mouvements différentiels pour expliquer la diversité des styles tectoniques: les assises rigides se tronçonnent en écailles séparées, ou se déplacent en blocs plus ou moins plissés en grandes charnières; tandis que les assises plastiques, tantôt « foisonnent » en amas où s'empilent d'innombrables et minuscules charnières, tantôt « se laminent » le long de « surfaces de décollement », prédestinées à devenir des « surfaces de charriage » séparant les grandes nappes.

De ce point de vue, le rôle du *Trias salifère* comme « lubrifiant » a été reconnu depuis longtemps (14). BUXTOUF a le premier montré que les calcaires du Jura s'étaient plissés en glissant sur un tapis de Trias salifère. Ce n'est point par hasard qu'il existe, à la base des nappes préalpines chablaisiennes et romandes, une « zone des gypses » (« zone des cols » des anciens géologues). Et ce n'est point non plus par hasard qu'une « zone des gypses » jalonne, depuis Briançon jusqu'à Tignes, la base de la « nappe des schistes lustrés ». C'est par l'intermédiaire d'une « cicatrice » gypseuse (zone des gypses du Pas du Roc) que la zone du Briançonnais vient, en Maurienne, chevaucher la zone subbriançonnaise³.

Dans cette zone subbriançonnaise entre Maurienne et Tarentaise, R. BARBIER (4) vient de nous montrer le rôle joué, non seulement par les assises plastiques du Trias, mais aussi par les « marnes oxfordiennes (s. l.) »; elles déterminent les styles tectoniques caractéristiques de chacune des différentes nappes ou digitations qui se succèdent en festons dans cette zone. Ainsi l'une de ces digitations, la « cordillère tarine » (zone des brèches de Tarentaise), où les érosions anténummulitiques, enlevant les marnes oxfordiennes, ont permis au Flysch transgressif de venir se « souder » aux assises résistantes du Lias-Dogger, du Trias inférieur et même du Cristallin, montre un style tectonique tout à fait différent de celui des unités voisines.

³ D'ailleurs, il ne faudrait pas croire que toute lame de terrain salifère jalonne nécessairement une grande dislocation. Soit dans les Alpes françaises, soit en Algérie (DALLONI), on connaît des quantités d'exemples d'injections de gypses et cargneules triasiques qui se disséminent au hasard, et sur lesquelles il serait dangereux de bâtir des synthèses tectoniques. Ainsi le noyau oxfordien du synclinal de la Valloirette (zone subbriançonnaise au N du Galibier) se montre injecté de lames de cargneules avec entonnoirs gypseux; si nous avons attribué à ces lames l'importance que certains géologues confèrent à des lames analogues dans les Préalpes, nous aurions été conduits à répartir entre deux unités tectoniques différentes le matériel de ce synclinal, qui constitue visiblement un ensemble homogène. — Voir M. GIGNOUX et L. MORET, Géologie et Morphologie de la vallée de la Valloirette (Savoie), du Col du Galibier à St-Michel-de-Maurienne (*Revue Géogr. alpine*, 25, Grenoble, 1937).

De même, dans les Alpes glaronnaises, R. HELBLING (22) a récemment montré que l'existence de plusieurs horizons plastiques avait déterminé *la différenciation de plusieurs nappes* constituées chacune par des assises rigides: nappe du Permien, nappe du Lias, nappe du Malm, nappe du Crétacé, etc. ⁴.

Depuis l'échelle de la coupe mince vue au microscope jusqu'à celle des panoramas de nos montagnes, nous retrouvons ainsi un *type d'écoulement des solides* que nous pourrions qualifier de « *laminaire* », pour reprendre un terme usité par les hydrauliciens qui décrivent les mouvements des liquides.

Il faut bien convenir qu'il n'y a là aucun argument qui nous « oblige » à évoquer l'action de la gravité. Bien au contraire, le seul mot de « *laminage* » nous fait immédiatement penser à une *compression* ⁵. Et de fait, dans toutes les expériences qui ont permis de reproduire en « modèles réduits » les phénomènes tectoniques, schistosité, plissements, formation d'écaillés et de surfaces de charriage, on a toujours recouru à une compression, entre les mâchoires d'un étau, de matières plus ou moins plastiques qui sont censées représenter les strates empilées dans l'écorce terrestre.

Mais tout récemment, notre attention a été attirée sur *un autre type d'écoulement*. Je fais allusion ici aux énormes accumulations de *Flysch à Helminthoïdes* qui, sur plus de 1.000 m. d'épaisseur, apparaissent aux flancs des vallées creusées dans les montagnes de Flysch de l'Ubaye et de l'Embrunais (voir pl. I-B). Les études récentes, et celles de D. SCHNEEGANS en particulier (37), ont définitivement montré que ce Flysch à Helminthoïdes, primitivement cou-

⁴ C'est en usant du langage de la tectonique d'écoulement que P. LOUY (Bull. Service Carte géol. France, n° 216, 1945, p. 186) vient de nous décrire d'une façon particulièrement suggestive la structure compliquée de la bordure externe de Belledonne; les zones de décollements correspondent ici au Trias gypsifère et aux marnes aaléniennes; et notre savant confrère est conduit, lui aussi, à évoquer le rôle de la gravité. Ainsi conçu, le style tectonique de cette bordure de Belledonne rappelle d'ailleurs d'une manière frappante celui des plis plongeants du Torrenthorn (bordure de l'Aar) que, grâce à la netteté des coupes naturelles dans ces hautes montagnes, M. LUGEON avait pu, il y a longtemps, dessiner avec tant de précision et de certitude.

⁵ Tous les géologues sentent intuitivement la différence entre « laminage » et « écoulement par gravité ». Traduite dans le langage de la Mécanique, cette opposition pourrait s'exprimer ainsi: « le laminage d'une masse rocheuse suppose que cette masse est soumise à des contraintes d'un ordre de grandeur supérieur à celles que mettrait en jeu, dans cette même masse considérée isolément, la seule gravité ». Ainsi, en parlant de laminage, on évite par là-même de faire jouer un rôle appréciable à l'écoulement par gravité. C'est pourquoi P. TERMIER, qui ne pensait pas à l'écoulement par gravité, a été obligé de recourir à son hypothèse du « traîneau écraseur »; mais il n'a jamais pu préciser quel était le moteur de ce traîneau.

verture de la zone du Briançonnais, s'était écoulé vers l'W, en écrasant sous lui les nappes et digitations de la zone subbriançonnaise plus externe, ainsi laminées et tronçonnées en « écailles subbriançonnaises ».

Lithologiquement, ce Flysch à Helminthoïdes est constitué par des alternances indéfiniment répétées, sur des centaines de mètres d'épaisseur, de minces assises (quelques centimètres ou décimètres) alternativement plus dures (calcaires ou gréseuses) et plus plastiques (argiles, schistes). Ainsi cette formation, hétérogène si on la regarde à l'échelle du mètre, apparaît *homogène* à l'échelle de la centaine de mètres; de fait les montagnes de Flysch se caractérisent par leurs pentes absolument uniformes et régulières, sur plus de 1.000 m. de hauteur (voir pl. I-B).

Or la tectonique de ce Flysch n'évoque ni laminage, ni mouvements différentiels. On y voit un empilement de charnières, souvent couchées jusqu'à l'horizontale, où les strates de calcaires (ou grès) et de schistes se recourbent et ondulent sans que leur épaisseur varie. Les délicates empreintes d'Helminthoïdes (pistes encore énigmatiques), avec leurs contournements réguliers, qui par milliers décorent les surfaces limites des lits calcaires ou gréseux, n'accusent pas la moindre déformation. Les calcaires ne sont pas marmorisés; et les schistes, mats, non luisants, ne montrent point de néoformations de minéraux phylliteux.

Reprenant le langage des hydrauliciens, nous pourrions parler ici d'un *écoulement turbulent*, tourbillonnaire, non laminaire.

A quoi notre Flysch à Helminthoïdes doit-il ce singulier privilège ? Il représente *la plus récente des formations* par lesquelles, dans le Briançonnais, s'est achevé le comblement du géosynclinal alpin. En s'écoulant vers l'W, il a pu jouer, par rapport aux unités subbriançonnaises, le rôle de « traîneau écraseur », mais il n'a pu être écrasé par rien. Même en admettant qu'à l'origine de son écoulement il y ait eu, dans la zone du Briançonnais, une sorte d'étau, agissant comme le fait la pression des doigts sur un tube de pâte dentifrice, il est bien certain que, sortie de ce « tube », la pâte qu'était le Flysch a débordé vers l'W en une coulée « turbulente » pour laquelle nous ne voyons guère d'autre moteur possible que la gravité.

Et c'est ainsi que D. SCHNEEGANS, avec ses collègues français, a été conduit à ajouter à la notion d'écoulement celle d'un écoulement par gravité ⁶.

⁶ Cette notion s'impose à tous ceux qui ont vu projeter le film cinématographique dessiné par L. MORET (34).

3. — La notion d'écoulement par gravité.

On peut aussi y être amené par d'autres voies.

Dès 1939 (15), j'avais été frappé par la remarque suivante: les nappes préalpines de la Savoie et de la Suisse romande ont une épaisseur qui est, au plus, de l'ordre du millier de mètres. Or, même en les enracinant au plus près, c'est-à-dire en arrière du Mont-Blanc et dans la zone Sion-Val Ferret, l'amplitude minimum du charriage est de l'ordre de la cinquantaine de kilomètres.

Il paraît alors difficile d'admettre que l'avancée de ces nappes soit due uniquement à une poussée venant de l'arrière, une sorte de « *vis a tergo* », comme dans les théories classiques. Cela se comprendrait si la mince lame constituée par notre nappe était rigide, comparable à une planche que l'on peut faire glisser sur une table en la poussant par un de ses bords. Mais rien ne témoigne d'une telle rigidité; bien au contraire, nous voyons dans la nappe les assises les plus compactes (calcaires massifs) se recourber et onduler en grandes charnières, tandis que les plus plastiques (argileuses) se laminent ou s'accroissent par foisonnement en une multitude de petites charnières.

La progression de la nappe ne nous apparaît nullement comparable à celle d'une planche que l'on pousse, mais bien à celle d'une flaque de goudron ou de miel déposée sur une table, que l'on chasserait avec une raclette et qui s'écoulerait en avant de la raclette en une série d'ondes ou de vagues en festons. Le moteur responsable de l'avancement et de la mise en place de la nappe serait donc, non point une compression, exercée par l'arrière, mais la simple action de la gravité; ou plutôt la compression, si compression il y a, ne serait intervenue qu'à l'origine de la nappe et seulement pour y provoquer une surélévation qui déclenche l'écoulement.

En reprenant l'image de notre flaque de miel étalée sur une toile cirée, nous pouvons supposer que cette toile se soulève comme une voûte, déterminant ainsi une « *intumescence* »; sur les flancs de cette intumescence, le miel s'écoulera par gravité.

Nous rejoignons ainsi une théorie explicitée pour la première fois par le géologue allemand HAARMANN (décédé pendant la dernière guerre). Pour HAARMANN en effet, la cause première de la formation d'une chaîne plissée, la « *tectonique primaire* », serait l'apparition d'une zone de surélévation, d'une « *géotumeur* », d'une intumescence; les plissements des strates superficielles ne seraient

qu'une « *tectonique secondaire* », née de l'écoulement de ces strates sur les flancs de l'intumescence.

Très longuement développées dans un ouvrage intitulé « *Oszillations-Theorie* » (21), les idées de HAARMANN ont fait, à la Société géologique allemande, le sujet de longues discussions, qui remplissent presque un volume entier du Bulletin de cette Société (vol. 83, 1930).

Le résultat de ce plébiscite, auquel participèrent 29 géologues de toutes nationalités ⁷, ne fut guère favorable à l'auteur. On fit remarquer qu'en admettant par exemple une pente de 20 % pour la surface d'écoulement, un charriage de 50 kilomètres exigerait une « intumescence » haute de 10 kilomètres. On lui objecta surtout que, si les roches pouvaient vraiment couler comme des fluides, les vallées escarpées de nos montagnes devraient être depuis longtemps comblées par l'écoulement de leurs versants.

Il faut dire aussi que HAARMANN ne s'était point fait connaître par des études personnelles détaillées de chaînes plissées : il ne pouvait passer pour un spécialiste de la Tectonique. Si ses théories avaient été émises par un Staub, un Argand, un Kober, ou un Lugeon, elles eussent été examinées avec un préjugé plus favorable.

Ajoutons encore que, comme l'avait fait WEGENER pour le « mobilisme », HAARMANN avait surajouté à la notion d'écoulement par gravité des développements de pure imagination, sans base concrète : le terme d' « Oszillations-theorie » était fort mal choisi ; il évoque pour ses lecteurs des hypothèses gratuites et a l'inconvénient de laisser dans l'ombre l'idée la plus nouvelle et la plus intéressante, celle d'un écoulement par gravité.

Enfin et surtout, il faut se rappeler que le public de géologues auquel s'adressait HAARMANN était moins familier que nous ne le sommes maintenant avec les nouvelles théories physiques qui tendent à effacer les frontières entre la mécanique des fluides et celle des solides (par exemple l'écoulement des métaux, devenu une réalité expérimentale).

Quoi qu'il en soit, les idées d'HAARMANN n'éveillèrent aucun écho. A tel point que son nom ⁸ est injustement oublié dans les publications récentes relatives à cette question. On reconnut que le terme d' « écoulement », mieux que celui de « compression », pouvait convenir pour décrire les plissements que nous voyons se dessiner aux flancs de nos montagnes ; il avait d'ailleurs déjà été

⁷ Ou en trouvera la liste dans (16), p. 40.

⁸ Comme ceux de MM. MAILLET et PAVANS DE CECCATY (voir plus loin).

employé depuis longtemps; mais on se refusa à admettre que la gravité pût, à elle seule, créer un champ de forces suffisantes pour provoquer cet écoulement.

Tout revient en effet à la question fondamentale et très précise suivante: *les solides que sont les roches peuvent-ils s'écouler sous l'action de forces très faibles, telles que celles mises en jeu par leur propre poids* ⁹ ? Or cette question est du domaine de la mécanique, de la dynamique des solides, de la résistance des matériaux, donc du domaine des physiciens et des ingénieurs; il semble qu'elle puisse être abordée par l'expérience.

4. — La tectonique expérimentale.

De fait, cette prise de contact entre ingénieurs et géologues a été tentée tout récemment ¹⁰ dans des publications dues à des ingénieurs (qui sont en même temps des géologues), MM. GOGUEL d'une part, MAILLET et PAVANS DE CECCATY de l'autre.

Dans un long mémoire, très documenté et plein d'idées ingénieuses et fécondes, J. GOGUEL (20) a cherché à voir si les expériences récentes faites par lui et avant lui (surtout en Amérique) sur la « résistance des matériaux », pouvaient nous aider à comprendre le mécanisme de la déformation des roches. J'en retiendrai seulement les principales conclusions.

Supposons un cylindre de roche compacte (par exemple un calcaire) placé dans un milieu gazeux ou liquide de température T et de pression générale, « hydrostatique », H , et soumettons-le à une compression, à une « pression orientée », P , parallèle à son axe et progressivement croissante.

⁹ Et, ajouterons-nous, avec des pentes analogues à celles que nous montre le relief terrestre et sous-marin actuel. Je crois en effet qu'à toutes les époques géologiques antérieures, notre globe devait avoir une orographie plus ou moins analogue à celle que nous lui voyons aujourd'hui; pourquoi l'époque où nous vivons aurait-elle eu le singulier privilège d'annihiler subitement et universellement les forces orogéniques ? C'est le « principe des causes actuelles »; se refuser à l'admettre, c'est attribuer à l'humanité entière, dernière venue sur cette terre, le pouvoir d'y arrêter, comme Josué ou Moïse, le cours du soleil ou le flot des marées.

¹⁰ On peut se demander pourquoi elle a tant tardé: de fait, parmi les géologues français fondateurs de la Tectonique, on relève les noms d'éminents ingénieurs, tels Elie de Beaumont, Marcel Bertrand, Pierre Termier, pour ne citer que les disparus; cela s'explique sans doute parce qu'ils appartenaient au « Corps des Mines » et étaient restés sans liaison avec l'École des Ponts et Chaussées; ils étaient devenus trop géologues.

A partir d'une certaine valeur P_p de P , le cylindre commencera à se déformer par écoulement plastique; son raccourcissement sera compensé, bien entendu, par un gonflement latéral: P_p est appelé « *seuil de plasticité* ». Si P continue à croître, le cylindre se brise et s'écrase; à ce moment P a atteint la valeur P_r , appelée « *seuil de rupture* ».

Quand H est égal à une atmosphère (expérience faite à l'air libre), P_r est très voisin de P_p , c'est-à-dire qu'on ne peut obtenir, avant rupture, qu'un raccourcissement très faible; il n'y a donc presque pas de déformation plastique; notre roche n'a subi qu'un « écoulement » insignifiant; par exemple, avec un calcaire, comprimé avec une pression P de 1.000 kgs par cm^2 , on ne peut obtenir, avant rupture, qu'un raccourcissement de l'ordre de 0,1 %. Par contre, si on augmente H , en plaçant le cylindre dans un bain d'huile comprimée à la presse hydraulique, P_r devient de plus en plus différent de P_p ; on peut ainsi obtenir un raccourcissement, un écoulement notable. Par exemple si $H = 1.600$ kgs par cm^2 , on pourra obtenir, avant rupture à la pression $P_r = 5.000$ kgs par cm^2 , un raccourcissement de 9 %¹¹.

En élevant la température T , on arriverait aussi à augmenter la « plasticité » de la roche.

Ces expériences nous montrent ainsi qu'une roche est d'autant plus déformable plastiquement, d'autant plus susceptible de s'écouler, que le milieu ambiant est à une plus haute pression hydrostatique et à une température plus élevée. C'est donc dans les zones profondes de l'écorce terrestre que les roches manifestent le plus de possibilités d'écoulement: nous le soupçonnions déjà.

Mais la pression orientée P_p nécessaire pour provoquer cet écoulement reste toujours très grande et très supérieure aux forces mises en jeu par le seul poids des assises rocheuses, même en pente très forte. Et J. GOGUEL conclut ainsi que *l'action seule de la gravité ne peut suffire à provoquer le plissement des couches*; il faut invoquer d'autres forces bien plus grandes, par exemple celles qui peuvent résulter de déplacements relatifs de deux compartiments voisins de l'écorce terrestre, forces que nous sommes incapables d'évaluer.

Mais ces expériences ou observations ne font pas intervenir la notion de temps; elles ne durent au plus que quelques dizaines d'années. Et rien ne nous empêche de penser qu'une pression très

¹¹ Ces chiffres sont extrêmement variables avec les conditions expérimentales; les valeurs indiquées ici ne sont destinées qu'à donner une idée des ordres de grandeur. Voir aussi (38).

faible, mais appliquée pendant des milliers d'années ou de siècles, finira par provoquer l'écoulement de notre calcaire.

Nous noterons en effet que la Science de la Résistance des matériaux, telle qu'elle est enseignée actuellement dans nos cours et nos traités, suppose implicitement que les propriétés de la matière sont celles qui nous apparaissent dans l'échelle de temps de la vie ordinaire¹². C'est bien naturel puisque cette science, poursuivant avant tout des buts pratiques, ne s'adresse pas à des hommes qui vivraient mille ans ou un millième de seconde. Pour bien faire comprendre à des ingénieurs et à des physiciens cette sorte de gymnastique intellectuelle nécessaire, en Géologie, pour changer d'échelle de temps, on peut, par exemple, leur poser la question suivante : « Dans quelle échelle de temps faut-il se placer pour pouvoir briser l'eau à coups de marteau ? » ; et les physiciens, d'abord un peu surpris par cette boutade, peuvent effectivement y répondre.

De fait, c'est bien la *notion de temps* que R. MAILLET et R. PAVANS DE CECCATY font tout de suite intervenir dans un article (33) qui a été pour moi une véritable révélation ; je m'en suis largement inspiré dans ce qui va suivre ; mais je n'en ai pas épuisé l'intérêt ; et on ne peut que conseiller vivement sa lecture à tous les géologues et géophysiciens qui s'intéressent à ces problèmes.

Leur point de départ est la critique, par R. MAILLET et F. BLONDEL (32), des expériences par lesquelles de nombreux géologues ont tenté de reproduire des plissements de strates en comprimant latéralement des lames de matières plus ou moins plastiques empilées. Ces expériences ne sont en somme que des « *essais sur modèles réduits* », méthode couramment employée par les ingénieurs hydrauliciens pour évaluer les poussées exercées sur un barrage, les modalités d'écoulement de l'eau dans un déversoir, la résistance à la progression d'une carène de navire, etc.

Dans ces divers essais, on observe des fluides au repos ou en régime permanent, de sorte que le temps n'intervient pas. Dans nos expériences tectoniques, il ne s'agit plus de statique, ni de cinématique, mais de dynamique ; il faut donc faire intervenir le facteur temps, lequel s'introduit précisément dans la plasticité, le pouvoir d'écoulement, de la matière employée.

¹² Dans ce qui va suivre, j'emploierai constamment l'expression d' « échelle » et non celle d' « unité ». Ainsi, dans la vie ordinaire, celle de l'ingénieur, l'échelle de l'espace sera comprise, par exemple, entre le 1/10^e de millimètre et le kilomètre, et l'échelle de temps entre le 1/10^e de seconde et l'année.

Pour pouvoir conclure numériquement du modèle à la réalité, il faut adopter *un même changement d'échelle pour toutes les grandeurs mesurables* entrant en jeu, c'est-à-dire les longueurs, les forces et le temps. Et le choix de ces unités implique l'emploi d'une matière de viscosité déterminée.

Supposons que nous voulions reproduire sur modèle réduit en 10 ans la formation d'une chaîne de montagnes qui a duré en réalité 10 millions d'années: les temps seront donc réduits dans le rapport de 10^6 . Les auteurs démontrent alors que l'on devra opérer avec une matière telle que, par rapport aux roches, le module d'élasticité soit réduit dans le rapport de 10^{12} et le coefficient de viscosité dans le rapport de 10^{18} . « Ainsi les matières qu'il nous faudrait employer
« dans le modèle réduit pour les soumettre à l'action de la pesan-
« teur devraient être à la fois extrêmement compressibles et extrê-
« mement peu visqueuses... ; bien loin d'employer du plâtre humide
« ou des couches de cire, il faudrait plutôt songer à des liquides
« légèrement visqueux tels que les solutions de gélatine ou de la
« pâte dentifrice diluée. Si l'on imagine une telle substance placée
« sur un plan incliné, même de très faible pente, elle s'écoulera
« en donnant naissance à des plis. Mais elle serait incapable de
« réagir par flexion à une compression tangentielle. »

Ainsi, par des raisonnements mathématiques absolument rigoureux, les auteurs aboutissent à une image qui rappelle singulièrement la flaque de miel que nous évoquions plus haut. Vues à l'échelle des temps géologiques, les roches leur apparaissent incapables de transmettre des poussées tangentielles; une « *vis a tergo* » serait impuissante à provoquer la progression d'un front de nappe; plis et charriages sont le résultat de l'écoulement par gravité, sur des pentes même extrêmement faibles. Changer ainsi notre échelle de temps, c'est nous accoutumer à « *penser en géologue* ».

5. — Les notions de temps géologique, de solide et de liquide.

Il n'est point étonnant que les ingénieurs, qui étudient, dans des buts pratiques, la résistance des matériaux, n'aient même pas l'idée de « *penser en géologues* ». Mais même parmi les théoriciens de la Physique et de la Chimie, qui devraient se guérir de toute myopie anthropocentrique et élargir leurs cadres de l'espace et du temps, et même parmi les géologues, je crois qu'il en est bien peu qui sachent vraiment penser à l'échelle des temps géologiques. L'Astrophysique d'une part, la Physique nucléaire de l'autre, les ont bien

habitué à s'évader du cadre de l'espace, et à penser dans les domaines des infiniment petits et des infiniment grands; mais rien, si ce n'est la Géologie, ne nous apprend à nous évader du cadre du temps. Et pourtant, si nous savions le faire, les problèmes géologiques et même physico-chimiques nous apparaîtraient sous un jour tout nouveau.

Cherchons par exemple à nous représenter comment les phénomènes géologiques de la dynamique externe, qui nous sont les plus familiers, car les plus rapides, apparaîtraient à un savant dont la vie entière se déroulerait en un millième ou un millionième de seconde. Contemplant un océan agité par la tempête, ce savant ne pourrait apprécier ni le mouvement des vagues, ni les courants atmosphériques; l'air et l'océan lui paraîtraient immobiles. Et certainement il n'aurait jamais l'idée de relier entre eux ces deux phénomènes, de chercher dans l'atmosphère, qu'il croit immobile, la cause des inégalités que lui montre la surface de l'océan, lequel lui paraît figé. Jamais il ne devinerait que le vent est la cause des vagues.

Et maintenant, revenant à l'échelle de notre vie réelle, disons-nous bien qu'un géologue qui cherche à comprendre la formation des chaînes de montagne aura, à en percevoir le mécanisme et les causes, autant de difficultés que tout à l'heure notre savant à la vie éphémère en avait à s'expliquer la formation des vagues de l'océan.

Au fond, ce qui empêche beaucoup de géologues de se rallier à la théorie de l'écoulement par gravité, c'est leur répugnance instinctive à admettre que *les roches solides puissent couler comme des liquides*¹³. Pour ébranler cette répugnance, que l'on me permette de recourir à deux exemples, parmi beaucoup d'autres analogues.

¹³ D'ailleurs les physiiciens contemporains s'habituent à ces notions nouvelles, telles que celle de « l'écoulement des métaux ». Et ils disposent même d'une donnée numérique qui leur permet de chiffrer expérimentalement, pour chaque corps, solide ou liquide, l'échelle de temps qu'il faudrait adopter pour le voir commencer à se déformer plastiquement: c'est celle du « temps de relaxation », évoquée si à propos par TREVISAN (39), temps qui serait de 10¹¹ secondes pour l'eau à 20°, de 0,3 à 30 ans pour les roches de la zone magmatique à 70 kilom. de profondeur, et de 2 à 50 secondes pour des profondeurs supérieures à 2.400 kilom. (ces deux dernières données fournies par la séismologie). Nous ne saurions trop recommander la lecture de l'article de TREVISAN, à la fois clair et profondément suggestif; l'auteur s'y déclare partisan enthousiaste de la théorie de l'écoulement par gravité, telle que je l'expose ici, et dans laquelle il voit « le commencement d'une période nouvelle dans l'évolution des conceptions tectoniques ».

Le premier, déjà évoqué par WEGENER, sera celui de la *cire à cacheter*. A la température ordinaire, un bâton de cire à cacheter nous apparaît comme un solide: nous pouvons le briser à coups de marteau, mais non le ployer, même au prix d'un effort relativement considérable: le seuil de plasticité se confond pratiquement avec le seuil de rupture. Pourtant posons ce bâton sur deux supports à ses deux extrémités et revenons le voir 15 jours plus tard: il sera déformé et courbé en arc sous la seule action de son poids. Ainsi il nous a suffi d'un minime changement d'échelle de temps pour que la cire à cacheter se révèle comme un corps très plastique, capable de s'écouler sous l'action de forces même très faibles. Et, ralenti et vu à cette même échelle de temps, notre coup de marteau ne brisera plus le bâton de cire; mais le marteau s'enfoncera dans la cire comme une cuillère dans un pot de miel.

Nous insisterons davantage sur notre deuxième exemple, celui de la *glace des glaciers*. A l'échelle de l'ingénieur, la glace est un solide qui, frappé à coups de marteau, se brise en éclats sans se déformer. Et pourtant nous savons fort bien qu'à une échelle de temps différente, celle du géographe, la glace est un corps plastique, susceptible d'un écoulement visqueux, sous l'action de forces extrêmement faibles; nous savons en effet que *les glaciers coulent*, comme des fleuves liquides, mais avec une vitesse environ 100.000 fois plus petite. De plus, l'analyse détaillée du mécanisme de cet écoulement¹⁴ va nous amener à de curieuses *comparaisons* avec l'écoulement des roches.

La paroi frontale d'un glacier (v. pl. I-A) montre souvent une *glace « rubanée »*, c'est-à-dire formée d'un empilement de tranches de structure ou d'aspect différents; leur épaisseur est de l'ordre du décimètre; elles sont parallèles au lit rocheux du glacier, et parfois séparées par des surfaces de friction (Abscherungsflächen, superficie di scorrimento longitudinale) le long desquelles ces tranches glissent ou ont glissé les unes sur les autres, la tranche supérieure glissant naturellement plus vite que la tranche inférieure, au-dessus de laquelle elle dessine parfois un petit redan. Il y a là une sorte d'*écoulement « laminaire »*, analogue à celui d'un fleuve tranquille, où la vitesse des filets liquides croît du fond vers la surface. CHAMBERLIN (8) a pu, au front du Glacier de la Brenva (versant italien du Mont-Blanc), enregistrer ces « *mouvements dif-*

¹⁴ Bien entendu, l'ancienne explication de l'écoulement en bloc du glacier, par fusion et regel de la glace comprimée contre les parois rocheuses, est aujourd'hui abandonnée.

férentiels »; ils se manifestent assez rarement, et alors ils se produisent généralement *par saccades*, par avancées brusques de quelques dixièmes de millim. ¹⁵, semblant ainsi se déclencher dès que la différence des contraintes supportées par deux tranches contiguës devient suffisante pour vaincre la résistance due au frottement de ces deux tranches. Notons dès maintenant qu'il y a là une curieuse analogie avec les *failles de décrochement* que l'on voit se former lors des grands séismes (par ex. la « St. Andreas fault » de Californie). Ces deux phénomènes « tectoniques » ¹⁶, l'un pour le glacier, l'autre pour les roches, sont les seuls qui se produisent avec une brusquerie suffisante pour être directement perceptibles à l'échelle humaine; c'est de la « *tectonique de choc* », pour reprendre le terme suggestif dont usent MAILLET et PAVANS DE CECCATY.

En tout cas, par cet écoulement laminaire, la glace est devenue « *schisteuse* », comme le devient une argile qui s'écoule par glissements différentiels; et, comme pour les roches, cette « schistosité » de la glace peut être totalement indépendante de la stratification primitive du névé.

Mais en même temps, un glacier est le siège d'un *écoulement en masse*, lent et continu, où la glace se comporte comme un *fluide visqueux*.

On l'a bien vu lors des travaux récemment effectués dans le Glacier de Tré-la-Tête (partie S du massif du Mont-Blanc). Pour amener dans le lac-réservoir de La Girotte le torrent alimenté par ce glacier, on a dû capter ce torrent à une cote supérieure à celle du front du glacier, donc aller installer un barrage de dérivation sous le glacier lui-même. A cette occasion on a creusé dans le glacier plusieurs tunnels qui ont permis des observations très intéressantes sur l'écoulement de la glace (44). On a constaté que ces tunnels se refermaient d'eux-mêmes peu à peu, par rapprochement de leurs parois, en quelques semaines; il n'y a pas là écoulement par tranches, mais bien écoulement d'ensemble. Cet écoulement peut même être du *type « turbulent »* ou tourbillonnaire, car on a remarqué qu'en certains points, le long des berges rocheuses, la glace s'écoulait vers l'amont; il se forme donc là des « tourbillons » ana-

¹⁵ Et dont le total peut atteindre 10-15 cms par 24 heures.

¹⁶ Ce sont là des déformations par « élastoviscosité », dont on trouvera une étude mathématique dans M. BOSSOLASCO, Su di alcuni fenomeni che si presentano nei ghiacciai et che dipendono specialmente dalle condizioni del movimento (*Zeitschr. f. Gletscherkunde*, 18, 1930); mais l'auteur n'avait pas connaissance des observations de CHAMBERLIN.

logues à ceux qui se produisent sur le bord des torrents dont la berge présente des saillants et des rentrants. Ce régime tourbillonnaire de l'écoulement de la glace se manifeste aussi nettement, à certaines époques (probablement à l'arrivée des ondes de crues), dans la falaise frontale du Glacier de la Brenva, dont J. BROCHEREL (6) a publié des photographies fort suggestives (voir pl. I-A). On y voit les rubanements accusés par la « schistosité » de la glace se recourber et onduler en souples charnières, tout à fait analogues à celles d'un schiste plissé, ou aux « plis pygmiques » d'un complexe d'anatexie granitique.

Entre la glace et un schiste, il y a d'ailleurs bien des analogies: la glace de glacier est un sédiment formé par l'accumulation de cristaux de neige et de poussières minérales, avec des pellicules interstitielles d'un liquide qui peut naître de la fusion des cristaux de glace ou au contraire cristalliser par congélation. De même un schiste était primitivement une vase formée d'une accumulation (un « jeu de jonchets ») de cristaux de calcite, de minéraux phylliteux, de menus grains de sable, le tout imprégné d'un liquide qui peut, soit dissoudre la calcite, soit la précipiter.

Et de même que l'écoulement tourbillonnaire provoqué au front du Glacier de la Brenva par l'arrivée d'une « onde de crue » se traduit par les multiples ondulations et les empilements de charnières qui s'accusent dans la paroi de glace rubanée, de même aussi les plissements empilés que nous avons vu se dessiner aux flancs des vallées entaillant les schistes du Flysch à Helminthoïdes traduisent l'écoulement par gravité de la nappe du Flysch¹⁷. Dans un cas comme dans l'autre, il s'agit d'un *écoulement libre*, superficiel, tandis que l'écoulement laminaire qui s'exprime par la structure schisteuse est comparable à un écoulement en « conduite forcée ».

On va sans doute m'objecter que, comme termes de comparaison, j'ai choisi deux « solides » exceptionnels: la cire à cacheter, dont la structure moléculaire est bien différente de celle d'une roche minérale, et la glace, solide qui diminue de volume en fondant et qui, dans un glacier, se trouve au voisinage de son point de fusion. Et les phénomènes de « métasomatose », de « néoformations cristallines », qui accompagnent l'écoulement d'un glacier ou d'une masse rocheuse sont sans doute bien différents. Je ne puis néanmoins m'empêcher de constater que le mouvement des glaciers nous aide à concevoir l'écoulement par gravité des nappes de charriage.

¹⁷ Ecoulement déclenché ici par l'arrivée d'une « onde d'intumescence » (voir plus loin).

Et surtout cette comparaison va aussi nous apprendre à *changer notre échelle de temps* suivant que nous voulons observer et comprendre successivement différents phénomènes géologiques.

De fait, la *surface d'un glacier* qui s'écoule n'est point plane et régulière comme devrait l'être celle d'un « fleuve de glace », comme l'est celle d'un fleuve liquide. Car les ruisseaux d'eau de fonte y creusent des rigoles, des vallées en miniature; les changements de pente du lit y font naître des crevasses, des cassures qui découpent la glace en séracs. Nous le comprenons facilement, car le creusement de ces vallées, l'écartement des parois de ces crevasses, se fait avec une vitesse bien plus grande que celle de l'écoulement plastique de la glace: mais la coexistence de ces deux phénomènes ne devient compréhensible que si nous changeons notre échelle de temps en les observant l'un après l'autre.

Et cela nous permet de réfuter l'objection fondamentale, disant « de gros bon sens », qu'on oppose toujours à la théorie de l'écoulement par gravité. Comment, nous dit-on, si vous admettez que les roches peuvent couler sur de faibles pentes (comme les glaciers), sous la seule action de leur poids, *comment se fait-il qu'il puisse encore subsister des inégalités de relief*, des montagnes et des vallées escarpées ?¹⁸. C'est tout simplement parce que les phénomènes qui dépendent de la « dynamique externe », érosion et sédimentation, se déroulent avec une vitesse infiniment plus grande que celle de l'écoulement des roches et, plus généralement, des déformations profondes et intimes de l'écorce terrestre.

Un écroulement de falaise calcaire, un grand glissement de terrains argileux aux flancs d'une vallée, sont comparables à une chute de séracs dans un glacier. Il suffit de vivre quelques dizaines de milliers d'années ou au plus 100.000 ans pour voir se creuser des vallées et se remplir des lacs. Mais il faudrait vivre plusieurs millions ou dizaines de millions d'années pour voir s'écouler les roches.

¹⁸ Ainsi J. GOGUEL (20) nous dit (p. 124) : « On ne peut parler d'un écoulement, même très lent, pour des roches qui forment actuellement des montagnes parfaitement durables. » Et plus tard (20 bis, p. 209) il insiste encore : « Nous estimons que la persistance du relief prouve que, pour la plupart des roches, la déformation reste rigoureusement nulle tant que l'effort ne dépasse pas une valeur déjà notable, et dont l'importance même du relief peut nous donner une idée. »

J'ai l'impression que beaucoup de géologues, oublieux du judicieux conseil de CHAMBERLIN¹⁹, n'ont pas encore suffisamment médité sur cette *comparaison d'un glacier et des roches* et n'ont pas aperçu toutes les conséquences qu'on peut en tirer.

L'une des plus importantes de ces conséquences est la suivante : *il ne nous est pas possible de supposer que l'écoulement des nappes puisse être guidé par les formes d'érosion de leur substratum autochtone*. Or, c'est précisément cette hypothèse qui, sous le nom de « *Reliefüberschiebungen* » (= charriages de reliefs topographiques = écoulement des nappes dans des vallées d'érosion), a été autrefois formulée avec netteté par O. AMPFERER et par Arnold HEIM, accueillie d'abord avec un certain mépris, puis de nouveau remise à flot par la vague d'enthousiasme qu'a soulevée dans le grand public l'éclosion de la théorie d'écoulement par gravité.

En particulier beaucoup de géologues font grand état de ces « *Reliefüberschiebungen* » pour expliquer la localisation des *nappes préalpines* chablaisiennes et romandes, ainsi que les détails de structure des *nappes helvétiques* de la Suisse orientale. Ils vont même jusqu'à espérer (13, p. 12) que l'on trouvera un jour, dans le substratum de ces nappes, des restes de dépôts continentaux prouvant péremptoirement que la surface sur laquelle elles ont coulé était bien une surface modelée par l'érosion continentale. Je pense au contraire qu'une telle découverte n'éclaircirait nullement la théorie de l'écoulement par gravité; car il serait bien difficile de comprendre *pourquoi les « vallées d'érosion » dans lesquelles les nappes se sont avancées n'ont pas été comblées par l'écoulement de leurs versants avant de l'être par celui des nappes*. Là encore, je crois que l'on reste victime de l'obsession argandienne de la « *vis a tergo* »; inconsciemment, on continue à considérer la nappe comme recélant en son sein un moteur propre, qui lui donne une vie indépendante de celle du substratum mort: la nappe qui s'avance serait alors comparable à cette « torpille terrestre » imaginée (et même réalisée) pendant la dernière guerre, et qui, recevant par un fil souple (ici la « racine » de la nappe) un courant électrique, pouvait progresser au milieu des terrains meubles.

De même, dans nos Alpes méridionales, on est souvent tenté (peut-être ai-je cédé moi-même à cette tentation) de dire que les

¹⁹ Ce conseil a déjà été reproduit dans (19), p. 404 : « When perplexed by clashing theories and discordant interpretations of earth deformation, the writer has frequently found that the best remedy for mental wandering in the field of tectonic is to turn to the glacier. Here is a rock of simplest sort actually undergoing deformation before our eyes. Its lessons are invaluable, but unfortunately too few geologists are sufficiently familiar with them. »

nappes de Flysch de l'Embrunais-Ubaye se sont avancées dans la « dépression » orographique comprise entre Pelvoux et Mercantour. De fait, cette idée renferme bien une part de vérité; mais alors, pour l'exprimer correctement, il faudrait l'énoncer ainsi: « les nappes de l'Ubaye-Embrunais se sont avancées dans l'ensellement tectonique entre Pelvoux et Mercantour ». Car les deux notions d'ensellement et d'écoulement par gravité apparaissent bien à une même échelle de temps, qui est celle de la Dynamique interne, et non de la Dynamique externe.

Je sais bien qu'il est difficile de se représenter comment se combinent entre eux ces deux phénomènes, celui de l'écoulement des nappes, et celui de l'érosion de ces nappes et de leur substratum; mais la comparaison avec un glacier nous donne un exemple concret d'une telle combinaison.

Revenant aux *Préalpes*, nous allons maintenant analyser de plus près les raisonnements ingénieux par lesquels M. LUGEON et E. GAGNEBIN (30) s'efforcent d'y découvrir des « preuves » d'un écoulement par gravité. Ils nous montrent d'abord que, dans sa région « radicale », la nappe des Préalpes médianes est formée d'un chapelet de grandes « dalles » calcaires (principalement calcaires triasiques; ex., dalle de Tréveneuse, p. 30) peu plissées, mais rigides et tronçonnées, séparées les unes des autres en autant de petites montagnes isolées: c'est ce qu'ils appellent les « *Préalpes rigides* »; ce morcellement, ce tronçonnement ne peuvent être dus, nous disent-ils, qu'à un phénomène de « *traction* ». Et ils ajoutent (p. 55):

« On ne peut concevoir en tectonique aucune force de traction qui agirait, que l'on nous permette cette image [et nous le permettons bien volontiers], comme la pince d'un dentiste arrachant une dent de son alvéole. La seule énergie de traction admissible est donc la pesanteur... Ces exemples [de phénomènes de traction dans les « Préalpes rigides »] suffisent pour établir le rôle de la gravité dans la mise en place des nappes préalpines. »

Si maintenant, comme terme de comparaison, nous choisissons le glacier et non le dentiste, nous serions conduits à assimiler l'avancée des Préalpes médianes à l'écoulement d'ensemble d'un glacier, et le tronçonnement des « Préalpes rigides » à l'effort de « traction » qui provoque les crevasses; nous serions alors tentés d'en conclure que le morcellement des « Rigides » s'est produit dans une échelle de temps tout à fait différente de celle de l'écoulement par gravité, donc, enfin, que la réalité, bien constatée, de ce morcellement par traction, ne nous permet pourtant pas de conclure, comme le font nos confrères de Lausanne, à la réalité d'un écoulement par gravité.

Mais notre raisonnement serait alors vicié par une erreur de principe: en effet la glace d'un glacier est un matériau relativement *homogène*; nous ne pouvons donc l'utiliser, dans nos comparaisons, que pour des phénomènes affectant des masses rocheuses relativement homogènes: tel était, nous l'avons vu, le cas du *Flysch à Helminthoïdes*. Là, la comparaison avec le glacier était tout à fait correcte; et c'est pourquoi D. SCHNEEGANS, L. MORET et moi avons vu, dans la nappe du Flysch de l'Ubaye-Embrunais, non pas une preuve formelle, mais tout au moins la vraisemblance d'un écoulement par gravité.

Le cas des *Préalpes médianes* est tout à fait différent: il s'agit là d'un matériau éminemment *hétérogène*, dont nous ne pouvons trouver nul équivalent dans un glacier. L'écoulement plastique des masses schisteuses des Préalpes (les « Plastiques » de M. L. et E. G.) et le tronçonnement des dalles calcaires des « Rigides » sont bien, comme l'ont senti instinctivement nos confrères de Lausanne, deux phénomènes connexes, se déroulant dans la même échelle de temps. Mais il faut voir là, non pas une « traction », notion anthropomorphique, derrière laquelle se cachent de mystérieuses et inavouées « *vires a tergo* »²⁰ (ici les muscles du dentiste), mais un simple

²⁰ De fait, en parlant de « traction », on pense à un solide plus ou moins rigide, par exemple une barre de fer ou un fil de plomb, que l'on cherche à allonger en tirant sur ses deux extrémités. Le mot de « traction » suppose donc que le corps sur lequel on tire peut *transmettre des efforts*; mais il n'a plus de sens si on l'emploie dans une échelle de temps à laquelle le corps *peut couler* par gravité: c'est le cas par exemple d'un canal plein d'eau et fermé par deux vannes que nous écartons: l'eau « s'allonge »; mais nous n'aurions pas l'idée de dire que c'est par suite de la « traction » que l'on exerce sur elle. En employant ce mot pour les nappes préalpines, il semble bien que nous écartions, a priori, la possibilité d'un écoulement par gravité pour ces mêmes nappes.

Enfin remarquons que le mot de « traction » peut s'appliquer à un solide déformable par *élasticité*, car un tel solide transmet des efforts. Il faudrait alors (mais je ne crois pas que M.L. et E.G. y aient pensé) comparer les dalles calcaires des Rigides à des lames de caoutchouc; mais, regardé à l'échelle de temps où il est élastique, le caoutchouc ne « coule » pas sous l'action de son poids. De sorte que, même dans cette hypothèse, nous nous interdisions encore, par là-même, de conclure à un écoulement par gravité. C'est ce dont nous avertit J. GOCUEL (20) en nous disant (p. 203): « les déformations élastiques sont pratiquement instantanées; au contraire les déformations plastiques sont très lentes », et (p. 120): « le cas des déformations élastiques, réversibles, ne présente que peu d'intérêt pour les géologues ».

Mais j'ajouterai que, bien au contraire, la Géologie fournit au Physicien l'occasion d'étudier, « au ralenti », un phénomène souvent attribué à l'élasticité. C'est le cas du soulèvement actuel des régions Nord-Baltiques, débarrassées de la surcharge des glaces quaternaires, mais continuant à s'élever (voir 17); ce soulèvement (1 m. par siècle) est tout à fait comparable à celui que nous montre, à l'échelle de temps de la vie ordinaire, une boule de caoutchouc,

phénomène de *laminage par mouvements différentiels*, banal, comparable par exemple au « boudinage » si bien étudié par WEGMANN et par GOGUEL, et qui transforme un banc de grès inclus dans des schistes en un chapelet de tronçons étirés. Dans l'échelle de l'espace, il y a évidemment un abîme entre une Bélemnite tronçonnée d'une part et les Préalpes rigides d'autre part; mais le mécanisme de la déformation est le même dans les deux cas; et pas plus que la Bélemnite, les « Rigides » ne nous forcent à invoquer la gravité. Aussi la « démonstration » donnée par M. L. et E. G. ne suffit pas à entraîner ma conviction.

Nous allons en avoir un exemple un peu différent en analysant l'étude minutieuse que D. AUBERT (3) nous donne de certains accidents du Jura suisse. D'après ses descriptions, dont je ne puis reproduire ici les détails, il me semble que ces accidents mettent en jeu deux « tectoniques » différentes, c'est-à-dire, pour reprendre encore le langage de MAILLET et PAVANS DE CECCATY, une *tectonique de choc* (celle qui, sur le glacier, donne naissance aux crevasses et aux séracs) et une *tectonique d'écoulement* (celle qui se traduit par le mouvement de la masse entière du glacier). De la deuxième ressort le charriage d'ensemble par lequel l'anticlinal de la Dent de Vaultion est venu recouvrir le synclinal crétacé du Lac Brenet; et là, comme toujours, il me paraît bien difficile de « démontrer » que ce chevauchement est dû à la gravité, comme aussi de « démontrer » que la surface sur laquelle il s'avance est une surface d'érosion, et non une surface de laminage tectonique. Au contraire, c'est d'une tectonique de choc que ressort « le petit lambeau de recouvrement de la Dernier..., lame de Jurassique supérieur qui s'est « décollée de la masse principale de la Dent de Vaultion, puis a « glissé au pied du Mont d'Orzeires ».

C'est de même à la tectonique de choc que serait dû le curieux « lambeau de recouvrement » décrit par H. VINCENNE (43) dans le

localement déprimée par compression, puis reprenant (en 1/10^e de seconde) sa forme primitive; à cette échelle de temps, nous pouvons alors parler d'élasticité, de compression, de traction. Mais pour le soulèvement baltique, que nous regardons à l'échelle des temps géologiques, nous expliquons le même phénomène en parlant de réajustement isostatique par courants magmatiques; et nous ne pensons pas plus à une traction ou à une compression que lorsqu'il s'agit de décrire les oscillations des niveaux d'un liquide dans deux vases communiquants.

Ces longues et subtiles digressions paraîtront peut-être fastidieuses à mes lecteurs; elles prêteront sans doute à critiques; je pense néanmoins que ces exercices de virtuosité ne sont point inutiles, car ils nous montrent avec quelle prudence les géologues doivent manier leur vocabulaire tectonique pour en tirer des conclusions mécaniques.

synclinal jurassien de la Valserine, et que D. AUBERT rappelle avec beaucoup d'à-propos. Là encore il s'agit d'un « lambeau de décollement » (de Jurassique supérieur) qui se serait détaché du versant « très abrupt de l'anticlinal du Reculet et aurait glissé sur les marnes argoviennes jusqu'au fond du synclinal. » C'est donc à tort, me semble-t-il, que D. AUBERT voit là « le premier exemple d'écoulement par gravité dans le Jura français »²¹.

Enfin, plus généralement, c'est à la tectonique de choc qu'il faut rattacher la curieuse « collapse structure » décrite par HARRISSON et FALCON aux flancs des anticlinaux de la Perse²².

Il y a, bien entendu, tous les passages entre cette tectonique de choc, ou d'éroulement, et les grands glissements de terrains que nous voyons se produire aux flancs des parois escarpées²³. Au contraire, il y a une coupure immense entre cette tectonique d'éroulement et la vraie tectonique d'écoulement, coupure qui ne peut être appréciée que si, comme je ne me lasse pas de le répéter, on se représente le formidable changement d'échelle de temps entre ces deux phénomènes.

Je voudrais à ce sujet attirer l'attention sur un fait bien banal, trop banal même pour qu'on songe à le remarquer: c'est l'absence de vides dans l'écorce terrestre; comment se fait-il que dans cette écorce, dite « solide », soumise à tant d'efforts variés, cassée, tordue et tirillée en tous sens, il ne subsiste point de fentes béantes.

A la vérité, nous savons qu'il existe des fissures ou cavités fort anciennes, mais alors pleines de gaz ou de liquides à la pression hydrostatique correspondant à leur profondeur, et d'où ces gaz et

²¹ Au contraire, décrivant dans les avant-monts du Jura dubisien de curieux exemples de « panneaux » de calcaires bajociens glissés sur des talus de marnes liasiques, A. BONTE (Bull. Service Carte géol. France, n° 216, 1945, p. 119) a bien raison de souligner qu'il ne s'agit nullement là de phénomènes « tectoniques ».

²² Voir à ce sujet J. GOGUEL (16, p. 343) et L. MORET (Précis de Géologie, 1947, p. 360); c'est Edouard ROCH qui, déjà depuis longtemps, avait attiré mon attention sur cet intéressant article. L. GLANGEAUD paraît avoir reconnu des accidents analogues dans le Jura bisontin.

Peut-être aussi pourrait-on expliquer de cette manière quelques-uns des minuscules lambeaux de recouvrement décrits par A.-F. DE LAPPARENT en Provence (Bull. Carte géol. France, n° 198, 1938, p. 49); je pense surtout au lambeau de Jurassique supérieur qui vient coiffer si curieusement le synclinal tertiaire de Bauduen et sur lequel j'ai déjà eu l'occasion d'attirer l'attention (C.R. Soc. géol. France, 1944, p. 114).

²³ Et qui, à un examen superficiel, peuvent parfois être confondus avec des structures dues à une vraie tectonique profonde. D. SCHNEEGANS (37, p. 167) en a donné un exemple très suggestif dans les parois du versant SW du Morgon (glissement de Norta, pl. XI, coupe III).

ces liquides jaillissent lorsque nous les atteignons par des sondages profonds. De même, dans un pot de miel, les trous que nous pouvons faire avec une cuillère se combleront très rapidement, tandis que des bulles d'air incluses dans la masse peuvent subsister très longtemps.

Les seuls *véritables vides* que nous connaissions dans la croûte terrestre sont tous *très récents*. Je fais allusion ici aux grandes grottes et galeries explorées par les spéléologues; elles semblent toutes dater du Quaternaire. Car on n'a jamais rencontré, à ma connaissance, d'anciennes cavités karstiques restées vides.

Les fouilles du barrage de Génissiat sur le Rhône ont découvert dans les calcaires urgoniens toute une série de cavités souterraines et d'avens datant du début du Tertiaire; toutes étaient intégralement colmatées par des sables et argiles injectés sous pression (structure fluidale), c'est-à-dire par les éléments les plus mobiles de leur couverture, ceux qui ont obéi le plus vite à la loi d'écoulement général des roches.

Les travaux d'exploration d'un autre grand barrage ont révélé, en plein massif de calcaires jurassiques, et jusqu'à près de 100 m. sous la surface, des cavités entièrement vides, larges de 2 ou 3 m. et hautes de plusieurs dizaines de mètres; les parois de ces cavités sont cannelées (miroirs de faille) et l'on n'y voit pas trace de croûtes tufeuses, ce qui exclut l'action des eaux courantes. Ce sont donc là des vides d'origine tectonique, nés de fractures radiales dans la voûte d'un anticlinal. Je crois ici que ces mouvements tectoniques sont très récents (Quaternaire ou Pliocène).

Dans l'un des chaînons jurassiens de la Savoie, celui de la Montagne des Princes, qui longe à l'E l'extrémité N du Lac du Bourget et qui correspond à une large voûte anticlinale, on voit, au-dessus de Motz-en-Chautagne, les calcaires jurassiques du flanc W de cette voûte profondément entaillés par des gorges étroites, rectilignes, simulant des cañons, mais qui ne peuvent avoir été creusées par des torrents puisqu'elles se trouvent presque au sommet de la montagne. Là encore je crois voir des sortes de crevasses tectoniques²⁴, tout à fait comparables aux crevasses des glaciers, et de formation très récente. Précisément nous avons toutes raisons de croire que les plis du Jura ont subi des déformations sensibles depuis le Pliocène. Et il serait sans doute facile de multiplier des exemples analogues.

²⁴ Mais je me refuse à employer ce terme, comme le fait A. WEGENER, pour les fjords de Norvège.

6. — Les courants magmatiques profonds et les ondes d'intumescence.

Depuis longtemps nous faisons appel à des *écoulements profonds* pour expliquer le *réajustement isostatique* des divers compartiments de l'écorce terrestre. La théorie de l'écoulement par gravité n'est que la transposition en surface de ces écoulements profonds. Mais l'atmosphère terrestre, siège du cycle des eaux, ne connaît pas de repos; de sorte que la « mer terrestre » ne peut jamais atteindre le calme plat, cet état d'équilibre que tendrait à réaliser la gravité.

Ainsi la pénéplation à laquelle travaillent tous les agents de la *dynamique externe* du globe, tend au même but que l'écoulement des roches par gravité, mais à un rythme infiniment plus rapide. De même certains glaciers, franchissant une falaise rocheuse, y progressent par brusques avalanches de séracs, au bas desquelles ils se régénèrent en reprenant leur lent écoulement plastique.

De sorte que, si la surface terrestre n'est jamais en équilibre, il faut en chercher les causes dans la *dynamique interne* du globe, dans l'action des « forces orogéniques ». Et comme la plupart des géologues estiment que ni la contraction de l'écorce par refroidissement, ni les dérives continentales ne suffisent à expliquer la mise en jeu de ces forces, il ne reste plus qu'à invoquer en dernier ressort, comme un « *deus ex machina* », les fameux « *courants magmatiques profonds* », l'« *Unterströmungslehre* » d'AMPFERER. Ce n'est là nullement résoudre le problème, mais seulement l'abandonner aux spécialistes de la Pétrogénèse profonde et de la Géophysique.

Ainsi les « géologues de surface » ne prétendent point expliquer la formation des « *intumescences* », origine de toute tectonique. Mais ils se représentent volontiers ces intumescences sous forme de *voûtes allongées*, dont la direction définit précisément celle de la chaîne plissée qui va naître. Cette voûte est d'ailleurs bien loin d'avoir toute la largeur qu'aura la chaîne; de sorte que, tout en restant étroite et de hauteur modérée, elle peut avoir des flancs en pente relativement raide: c'est le long de ces flancs que les sédiments s'écouleront.

Nous pouvons ensuite imaginer que *cette voûte se déplace*, comme une *onde* qui progresse perpendiculairement à son allongement: la chaîne plissée gagne ainsi progressivement en largeur, et les nappes peuvent s'écouler de plus en plus loin de leur faite d'origine. Pour prendre une comparaison un peu grossière, imaginons que l'on

veuille faire s'écouler une flaque de vin versé sur une nappe de toile cirée. Au lieu de soulever très haut la nappe par l'un de ses bords, nous pouvons introduire sous la nappe une minuscule règle que nous ferons glisser de manière à provoquer de proche en proche l'écoulement de la flaque de vin. Nous concevons ainsi qu'une intumescence de hauteur relativement faible puisse, en se déplaçant, donner naissance à un écoulement à longue distance.

Remarquons d'ailleurs que la surface sur laquelle une nappe s'est autrefois écoulée a pu être *déformée* par des *ondulations postérieures*; ainsi, en supposant que les nappes préalpines de la Savoie se soient écoulées d'un faite situé au SE du Mont-Blanc, il faut admettre que lorsque cet écoulement s'est déclenché, le socle cristallin du Mont-Blanc ne constituait pas, comme maintenant, une voûte culminante, mais bien un glacis en pente continue vers le NW.

Nous concevons aussi que l'histoire d'une chaîne plissée est quelque chose de très long, et que *les plissements n'y sont point partout simultanés*. Ainsi, dans les Alpes françaises, nous savons que les mouvements orogéniques ont débuté localement au cours du Jurassique et du Crétacé (discordances antésénoniennes et anténummulitiques); toutefois, à ces époques lointaines, nous ne savons point y démêler le rôle relatif des écoulements par gravité et de la « tectonique profonde », dont nous parlerons plus loin. Mais après le remplissage géosynclinal de la fin de l'Eocène, nous pouvons imaginer qu'une *onde d'intumescence* est apparue dans la zone du Briançonnais, déclenchant l'écoulement de la « nappe du Flysch » vers l'W, vers la dépression subsidente qui s'étendait alors à l'emplacement actuel des chaînes subalpines. Puis cette onde a *progressé*²⁵ *vers l'W*, provoquant l'écoulement dont témoignent nos plis subalpins, où la molasse miocène est pincée au creux des vagues. Actuellement notre onde atteint le bord externe de ces chaînes subalpines, et ce bord continue à s'écouler vers les dépressions périalpines, dont la subsidence est démontrée par l'accumulation de sédiments récents du Miocène supérieur, du Pliocène, du Quaternaire : le Jura tend ainsi à s'écouler vers les plaines de Bresse, avec des chevauchements récents, dans lesquels est impliqué le Miocène supérieur (Pontien d'Ambérieu-en-Bugey); la Chartreuse et le Vercors tendent à s'écouler vers les plaines rhodaniennes (écaillés de Barcelonne, à l'E de Valence); les falaises jurassiques des abords

²⁵ On trouvera plus de détails dans (16); depuis, L. TREVISAN (39) a très heureusement développé, avec exemples à l'appui, cette notion de la progression des ondes d'intumescence.

de Moustiers-Sainte-Marie (S de Digne) se déversent vers la profonde fosse de Digne-Forcalquier (Pliocène redressé de Saint-Jurs); enfin c'est vers les abîmes méditerranéens de la Riviera que s'écoulent les dalles calcaires « rigides » des Alpes niçoises (nappe du Mont-Agel), où le Pliocène est parfois relevé à la verticale.

On peut suggérer (?) ici une curieuse remarque. D'après J. ROTHÉ (36) nos chaînes subalpines et nos massifs cristallins externes seraient des régions à peu près complètement *aséismiques*: l'onde d'intumescence, progressant vers l'W, les a déjà dépassées. Tandis que les bordures externes des Alpes, c'est-à-dire les régions où nous avons la preuve de mouvements très récents, semblent être affectées seulement de *séismes à foyers peu profonds*, parfois intenses (Nice, Provence, Tricastin), mais très localisés. Au contraire les séismes qui, même très faibles, se propagent sur de grandes longueurs de la chaîne et qui témoignent ainsi de *foyers profonds*, affectent la zone alpine interne. J. ROTHÉ trace ainsi, avec plus ou moins de certitude, une « ligne séismique » qui suivrait à peu près le bord externe de la zone du Briançonnais, par Guillestre, Bourg-Saint-Maurice et la zone Sion-Val Ferret ²⁶.

On est tenté de retrouver encore là les manifestations de ces deux tectoniques différentes, dont l'opposition a été bien soulignée par MAILLET et PAVANS DE CECCATY : une *tectonique d'écoulement*, superficielle, dont le moteur est la gravité, et une « *tectonique de choc* », discontinue, où des forces orogéniques d'origine profonde déclenchent par saccades des glissements le long de « surfaces listriques » plongeant jusque dans le tréfonds de l'écorce. Si les nappes et plis marginaux des Alpes sont l'œuvre d'une tectonique d'écoulement libre (tectonique secondaire de HAARMANN), les « régions de racines » témoigneraient d'une tectonique de compression, et, pour ainsi dire, d'une « tectonique forcée ». Confirmant une constatation déjà faite depuis 1932 par le célèbre séismologue SIEBERG, J. ROTHÉ (36, p. 7) insiste sur le fait que « ce ne sont pas les régions des nappes elles-mêmes qui sont séismiques, mais bien leurs zones de racines ».

²⁶ C'est-à-dire précisément une « zone de racines », ou « zone de succion » (voir plus loin).

7. — Le problème des « zones de racines ».

De fait, de très bonne heure, est apparu dans les Alpes un grand contraste entre les « régions de nappes » et les « régions de racines »; au style horizontal, « tangentiel », des premières, s'oppose le *style isoclinal* des secondes, où les couches s'enfoncent toutes régulièrement en profondeur, et sont même parfois *verticales*.

Autrefois ce style isoclinal paraissait aisé à interpréter: on y voyait simplement un paquet de plis comprimés et plus ou moins laminés: par contre le mécanisme de la progression des nappes restait plus énigmatique; mais la réalité de ces nappes ne pouvait être mise en doute; on les concevait comme de grands plis couchés, le plus souvent sans flanc inverse. Quand l'érosion avait rompu la continuité entre nappes et racines, on s'efforçait de repérer, dans la « zone des racines », des terrains de même âge et de même faciès que dans une de ces nappes; là on plaçait la « racine » de cette nappe. C'est ainsi que beaucoup de géologues suisses étaient conduits à enraciner les nappes préalpines au-delà de la zone pennine; car, au-delà des racines des nappes ultra-helvétiques, ils ne trouvaient nulle part, en Suisse, dans cette zone pennine (Primaire, Trias, schistes lustrés), des terrains jurassiques et crétacés à faciès « préalpin »²⁷.

Dans la théorie de l'écoulement par gravité, on voit que le problème des racines se pose tout autrement, et que, même, *on ne peut plus parler de « racines »*. La zone d'où est parti l'écoulement doit maintenant nous montrer à nu, dépouillé, le socle sur lequel l'écoulement s'est produit; on pourrait dire qu'il y a eu « *dénudation tectonique* »²⁸, et non dénudation par érosion. Par exemple, si nous ne voyons maintenant ni Jurassique supérieur, ni Crétacé, ni Tertiaire sur nos massifs cristallins externes (Mont-Blanc, Belledonne, Pelvoux, Mercantour), ce n'est peut-être pas seulement parce que l'érosion leur a enlevé leur couverture, c'est aussi parce que cette couverture tout entière s'est décollée et se retrouve maintenant dans les chaînes subalpines: il est donc tout à fait inutile de s'obstiner à

²⁷ Cet ancien dogme de l'enracinement lointain des Préalpes paraît bien avoir été définitivement répudié par M. LUGEON et E. GAGNEBIN (30, p. 64); mais ils semblent aussi avoir vu que la théorie de l'écoulement par gravité rendait encore plus vague cette notion de « racine »; car ils ajoutent: « Où s'enracinent exactement les diverses nappes des Préalpes? C'est un problème que nous n'examinerons pas ici. »

²⁸ L. TREVISAN (39) a appliqué cette notion au cas de l'île d'Elbe.

rechercher, dans ces massifs, la trace de la « racine » de tel ou tel pli couché ou nappe de ces chaînes subalpines ou helvétiques.

Dans certains cas, il est même possible que ces socles dénudés aient été, lors des phases postérieures de l'histoire de la chaîne, de nouveau submergés sous des écoulements provoqués par l'apparition de nouvelles intumescences. Enfin il faudra aussi se rappeler qu'une même onde d'intumescence peut donner naissance, sur ses deux flancs, à des écoulements en directions opposées ²⁹.

Ainsi, dès que nous admettons le principe de l'écoulement par gravité, on voit qu'il nous faut renoncer à « enrégimenter » et à « géométriser » nappes et racines dans des cadres rigides, comme on tentait de le faire dans la tectonique classique. *Reconstituer la cinématique d'une chaîne plissée* devient aussi difficile que de retracer les trajets des filets liquides dans un torrent à écoulement turbulent ou dans une chaudière remplie d'eau bouillonnante, dont la surface s'anime d'intumescences et de subsidences traduisant le régime des courants de convection ascendants et descendants.

Autrefois, c'était la mise en place des nappes qui paraissait un problème obscur. Aujourd'hui, la théorie de l'écoulement par gravité nous permet de décrire avec précision et élégance l'histoire des régions de nappes. Je dirais même qu'elle nous offre tellement de possibilités d'explication, elle s'adapte si aisément et avec tant de souplesse à n'importe quel détail de structure des chaînes plissées, que, comme nous le disions au début, ces « démonstrations » perdent en rigueur ce qu'elles gagnent en facilité. Et, une fois admis le principe de la théorie, c'est précisément cette facilité qui a fait son succès.

MM. LUGEON et GAGNEBIN viennent de nous en donner un magnifique exemple pour les nappes préalpines, qu'ils ont si minutieusement étudiées. Mais où est la région d'où ces nappes se sont écoulées ? Quelle en a été l'histoire ? N'a-t-elle pas été, depuis, submergée sous des couvertures postérieures, ou au contraire engloutie par succion en profondeur ?

De fait, le gros problème est maintenant celui de la *structure des zones de racines*. Car cette structure est, comme nous l'avons déjà dit, bien différente de celle des régions de nappes et de plis.

²⁹ C'est effectivement à un écoulement dirigé vers l'intérieur des Alpes que font appel M. LUGEON et E. GAGNEBIN pour expliquer l'allure des plis et écaillés du front préalpin (30, p. 76) et le relèvement du front helvétique au Pilate et au Säntis (30, p. 83, et 13, p. 6).

Il est frappant de voir, en Valais, les racines des nappes ultra-helvétiques s'engloutir brusquement, aux abords de Sion, sous le tréfonds du « front pennique ». Il est frappant de voir, au faite de l'« éventail briançonnais », en Queyras par exemple, des séries (Trias, Jurassique, Crétacé) isoclinales s'enfonçant verticalement à toute profondeur; car je ne connais aucun argument qui oblige à considérer la zone du Briançonnais, dans son ensemble, comme une grande nappe venue de loin et replissée ensuite secondairement³⁰. Quoi qu'il en soit, et cela seul nous importe pour le moment, la structure isoclinale, le style vertical de nos zones de racines ne peuvent être l'aboutissement d'un écoulement par gravité; il faut en chercher une autre explication.

Dans le langage de la tectonique classique, ces « zones de racines » sont décrites comme des « zones de compression » entre des mâchoires d'étau, entre des « serres », auxquelles on s'efforce de donner une réalité en les baptisant de noms magiques, mais bien mystérieux, continent européen, continent saharien, Eurasie, Gondwanie. Mais le trait principal, le trait vraiment caractéristique, de ces zones de racines réside surtout dans la plongée en profondeur de la couverture sédimentaire. Aussi, mieux que le terme de « compression », je préférerais employer celui de « succion ». Les « zones de racines » seraient des « zones de succion », des « zones d'engloutissement » des *Verschluckungszonen*, suivant l'expression créée par AMPFERER il y a déjà 40 ans, dans une série de publications qui, comme le rappelle R. STAUB, parurent bien « révolutionnaires » aux partisans de la tectonique classique.

Nous avons aujourd'hui, au moins en Science, moins peur des révolutions. De fait, récemment, J. CADISCH (7), dont les belles synthèses alpines restent tout à fait dans les cadres de la tectonique classique, est néanmoins amené à introduire cette notion de « succion ». Il rappelle que les plissements et redoublements de la couverture sédimentaire dans les Alpes témoignent d'un froncement, d'un rétrécissement, de cette couverture. Mais quand elle s'est déposée, il y avait en dessous un socle ancien, resté solidaire de la couverture sur les deux marges de la chaîne, et qui a donc dû, sous cette chaîne, se rétrécir aussi. Puisque ce socle ne s'est point déversé

³⁰ Le bord externe de cette zone se montre bien, localement, frangé de très anciens écoulements, de petites « nappes élémentaires » (nappes du Guil, écailles des montagnes entre Briançon et Vallouise), parfois déversées sur la zone subbriançonnaise (fenêtre de L'Argentière); mais n'oublions pas que dans le noyau d'un de ces festons apparaît, au Plan de Phasy près Guillestre, un granite identique à celui du Pelvoux.

ni froncé vers le haut, il a dû se rétrécir en se fronçant vers le bas dans une zone d'engloutissement ³¹.

Nous rejoignons ainsi à la fois les conceptions d'AMPFERER, certaines idées exprimées avec quelque fantaisie par KRAUS (voir 15) et même l'audacieuse théorie des « *boucles orogéniques* », formulée récemment par les géologues néerlandais (38, 40, 41, 42) au sujet des chaînes pacifiques. Si je les ai bien compris, le trait capital de la structure de ces chaînes serait pour eux la formation d'une « boucle » de la croûte superficielle sialique, boucle pincée et s'enfonçant obliquement en profondeur le long de « surfaces listriques » ; là seraient les foyers des séismes profonds ; là se localiseraient les zones d'anomalies négatives de la gravité ³².

Nous retrouvons ainsi nos « zones de succion », se traduisant en surface par les « zones de racines ».

Quant aux moteurs responsables de ces succions, nous avons à notre disposition un terme commode pour les qualifier : ce sont évidemment les *courants magmatiques profonds*, les mêmes, d'ailleurs, que l'on évoquait soit comme causes, soit comme effets, du rapprochement des « serres » ; et le terme de succion nous permet d'esquiver le problème de la recherche de ces « serres » ³³.

³¹ Des idées analogues ont été développées par D. AUBERT (3) pour le trifonds du Jura.

³² Dans une étude éminemment suggestive, J. JUNG (24) rappelle que, dans les Alpes suisses, KOSSMAT avait déjà montré que l'axe des anomalies négatives de la gravité coïncide avec le front de la zone pennique et la partie interne des massifs cristallins, c'est-à-dire avec notre « zone de succion » Sion-Val Ferret. JUNG fait remarquer (p. 20) que, dans les Alpes françaises, cet axe passe par Briançon ; il ajoute que dans les Alpes suisses, mieux étudiées à ce point de vue, on peut estimer à 50-100 kilom. la profondeur de « plongée » de la racine gneisso-granitique dans le magma basique. Au total, il est conduit à se faire, de la structure profonde des Alpes, une représentation (fig. 13) très différente de celle d'ARGAND et rappelant au contraire singulièrement les schémas dessinés par les géologues et géophysiciens néerlandais pour les « chaînes en arc » du Pacifique (40).

En France, la seule étude théorique publiée sur les séismes profonds et les anomalies de la pesanteur est celle de J. COULOMB (*Ann. de Géophys.*, L, 3, 1945).

³³ La notion d'un avant-pays alpin, d'une « serre européenne » rigide, matérialisée par nos massifs hercyniens, Massif Central, Vosges, Forêt-Noire, et s'opposant aux « séries compréhensives » souples du géosynclinal mésogéen, paraît, elle aussi, ébranlée par la vague de scepticisme qui vient, peu à peu, en sourdine, ronger l'édifice des dogmes argandiens. C'est G.-B. DAL PIAZ qui, à la suite de ses études sur les massifs cristallins internes piémontais, admet, comme CORNELIUS, que la « discordance hercynienne » s'étend à tout le domaine des Alpes occidentales ; j'étais volontiers disposé à le suivre ; et j'ai été agréablement surpris en constatant que M. LUGEON et E. GAGNEBIN semblent maintenant (30, p. 60) inclinés à en faire autant.

Ainsi toute la tectonique se réduirait à une sorte de double jeu : écoulement par gravité pour la tectonique superficielle, bouillonnement de courants magmatiques pour la tectonique profonde. La tâche du géologue est surtout de décrire la tectonique superficielle ; il y est tant bien que mal parvenu ; mais il laissera aux Pétrographes et aux Géophysiciens (25, 35) le soin de nous décrire les courants magmatiques, d'en préciser les moteurs, et d'en imaginer les régimes de circulation sous les continents et sous les chaînes plissées. Pour le tenter, ils ne devront pas oublier que notre Physique et notre Chimie usuelles ne nous ont appris à connaître que des phénomènes-éclairés ; ils devront imaginer toute une Physico-Chimie nouvelle, au prix de laquelle la nôtre n'est que balbutiements d'éphémères ; la désintégration de la matière, les phénomènes radio-actifs, dont certains se déroulent précisément, comme les courants magmatiques, à l'échelle des temps géologiques, commencent à nous en faire soupçonner la mystérieuse complexité.

Ainsi méditée, la Géologie, en élargissant le cadre du temps, perd sans doute en apparente précision ce qu'elle gagne en profondeur.

Il en est de même de la Physique moderne ; en élargissant le cadre de l'espace, les Physiciens nous ont appris à analyser la structure de l'atome ; et pour eux, la « voûte céleste », toute cloutée d'étoiles, qui emprisonnait nos ancêtres, s'est dilatée jusqu'à la sphère de l'univers einsteinien. Mais en même temps leur conception de la matière n'a plus rien de commun avec les grossières images que nous en suggèrent nos sens : pour en comprendre les manifestations, ils la réduisent à des concepts abstraits, que seules peuvent exprimer les formules mathématiques de la Mécanique ondulatoire.

Dans cette spiritualisation de la matière, la Géologie a aussi son rôle à jouer : en nous montrant combien, vues à l'échelle des temps géologiques, des notions sensorielles grossières, comme celles de « solide » et de « liquide », se transforment et se dissolvent, la Géologie contribue aussi à cette dématérialisation de l'univers, à cet élargissement du domaine de l'esprit, progressivement libéré de la prison des sens.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

1. AMPFERER (O.). — Ueber die Gleitformung der Glarner Alpen. — *Sitzungsber. Akad. Wiss. Wien*, Abt. I, 143, 1934.
2. AMPFERER (O.). — Ueber die Bedeutung von Gleitvorgänge für den Bau der Alpen, *ibid.*, Abt. I, 151, 1942.
3. AUBERT (D.). — Le Jura et la tectonique d'écoulement. — *Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne*, 83, 1945.
4. BARBIER (R.). — De l'importance du matériel stratigraphique dans la détermination du style tectonique des nappes alpines. — *C.R. Soc. Géol. France*, 8 avril 1946, p. 123.
5. BERTRAND (L.). — Sur le rôle des glissements tangentiels par gravité et des décollements dans la tectonique provençale. — *C.R. Soc. Géol. France*, 1^{er} février 1943.
6. BROCHEREL (J.). — La pseudo-stratification du Glacier de la Brenva. — *Augusta prætorica, Revue valdôtaine*, 5^e année, n° 11-12, nov.-déc. 1923, Aoste.
7. CADISCH (J.). — Die Entstehung der Alpen im Lichte der neuen Forschung. — *Verh. Naturf. Ges. Basel*, 54, 1942.
8. CHAMBERLIN (ROLLIN K.). — Instrumental work on the nature of glacier motion. — *Journ. Geol.*, 36, n° 1, Chicago, 1928.
9. CORROY (G.). — Les plis couchés de Provence en face de la théorie de l'écoulement par gravité. — *C.R. Soc. Géol. France*, 21 déc. 1946, p. 206.
10. DAL PIAZ (G.B.). — L'influenza della gravità nei fenomeni orogenetici. — *Atti R. Accad. Sc. Torino*, 77, 1942.
11. GAGNEBIN (E.). — Vues nouvelles sur la Géologie des Alpes et du Jura. — *Bull. Soc. neuchâteloise Sc. Nat.*, 67, 1942.
12. GAGNEBIN (E.). — Les idées actuelles sur la formation des Alpes. — *Actes Soc. helvétique Sc. nat.*, 122^e session, Sion, 1942.
13. GAGNEBIN (E.). — Quelques problèmes de la tectonique d'écoulement en Suisse orientale. — *Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne*, 80, 1945.
14. GIGNOUX (M.). — La tectonique des terrains salifères; son rôle dans les Alpes françaises. — *Livre jub. Soc. Géol. France*, 2, Paris, 1930.
15. GIGNOUX (M.). — Une nouvelle synthèse tectonique; l'ouvrage de E. Kraus, « Der Abbau der Gebirge ». — *Revue Géogr. alpine*, 27, Grenoble, 1939.
16. GIGNOUX (M.). — Quelques réflexions sur des théories tectoniques récentes. — *Travaux Lab. Géol. Univ. Grenoble*, 23, 1942.
17. GIGNOUX (M.). — La notion de temps en Géologie. — *Rev. Sc. nat. Auvergne*, 8, 1942.
18. GIGNOUX (M.) et MORET (L.) (avec la collaboration de D. SCHNEEGANS et de P. LORY). — Description géologique du bassin supérieur de la Durance. — *Travaux Lab. Géol. Univ. Grenoble*, 21, 1938.
19. GIGNOUX (M.) et MORET (L.). — Géologie dauphinoise. — Arthaud, Paris-Grenoble, 1943.
20. GOGUEL (J.). — Introduction à l'étude mécanique des déformations de l'écorce terrestre. — *Mém. Carte Géol. France*, Paris, 1943.
- 20 bis. J. GOGUEL. — La tectonique d'écoulement. — *Revue scient.*, n° 3256, 1^{er} sept. 1946.
21. HAARMANN (E.). — Die Oszillations-Theorie; eine Erklärung der Krustenbewegung von Erde und Mond. — F. Enke, Stuttgart, 1930.

22. HELBLING (R.). — Zur Tektonik des St. Galler Oberländer und der Glarner alpen. — *Mat. Carte géol. Suisse*, n. s., 76^e livr., 1938.
 23. GLANGEAUD (L.). — Les glissements posttectoniques dans le Jura et leur rôle dans les interprétations structurales. — *C.R. Acad. Sc.*, 218, p. 466, 13 mars 1944.
 24. JUNG (J.). — La Géologie profonde de la France d'après le nouveau réseau magnétique et les mesures de la pesanteur. — *Ann. Inst. Phys. du Globe Univ. Paris*, II, 1933.
 25. KUHN (W.) et RITTMANN (A.). — Ueber den Zustand des Erdinnern und seine Entstehung aus einem homogenen Urzustand. — *Geol. Rundschau*, 32, H. 3, 1941.
 26. LOMBARD (Augustin). — Remarques sur la notion de tectonique d'écoulement. — *C.R. Soc. phys. Hist. nat. Genève*, 57, 1940.
 27. LUGEON (M.). — Sur la formation des Alpes franco-suissees. — *C.R. Soc. Géol. France*, 1940, p. 7.
 28. LUGEON (M.). — Une hypothèse sur l'origine du Jura. — *Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne*, 73, 1941.
 29. LUGEON (M.). — Une nouvelle hypothèse tectonique : la diverticulation, note préliminaire. — *Bull. Soc. vaudoise Sc. nat.*, 61, n° 260, 1943.
 30. LUGEON (M.) et GAGNEBIN (E.). — Observations et vues nouvelles sur la Géologie des Préalpes romandes. — *Bull. Lab. Géol. Univ. Lausanne*, 72, 1941.
 31. LUGEON (M.) et SCHNEEGANS (D.). — Sur le diastrophisme alpin. — *C. R. Acad. Sc.*, 210, p. 187, 15 janv. 1940.
 32. MAILLET (R.) et BLONDEL (F.). — Sur la similitude en tectonique. — *Bull. Soc. Géol. France*, 5^e s., 4, 1934.
 33. MAILLET (R.) et PAVANS DE CECCATY (R.). — Le Physicien devant la Tectonique. — *Congrès mondial du Pétrole*, Paris, juin 1937.
 34. MORET (L.). — Présentation d'un film cinématographique en couleurs sur la formation géologique des Alpes françaises. — *Travaux Lab. Géologie Univ. Grenoble*, 21, 1937.
 35. RITTMANN (A.). — Zur Thermodynamik der Orogenese. — *Geol. Rundschau*, 33, 1942.
 36. ROTHÉ (J.). — La Séismicité des Alpes occidentales. — *Ann. Inst. Phys. du Globe, Univ. Strasbourg*, 3, 1938 (Clermont-Ferrand, 1941).
 37. SCHNEEGANS (D.). — La Géologie des nappes de l'Ubaye-Embrunais entre la Durance et l'Ubaye. — *Mém. Carte Géol. France*, 1938; Thèse Sc. Grenoble, 1938.
 38. SITTER (L.U. DE). — Plastic deformation. — *Leidsche geol. Meded.*, 9, 1937.
 39. TREVISAN (L.). — Nuovi orientamenti dello studio della tettonica. — *Historia naturalis*, 1^o anno, n° 3, Roma, 1946.
 40. UMBGROVE (J.-H.-F.). — Different types of Island-arcs in the Pacific. — *Geogr. Journ.*, 106, London, 1945.
 41. VENING MEINESZ (F.-A.). — The Earth's crust deformation in the East Indies. — *Proc. Kon. Nederl. Akad. Wet.*, 43, 1940.
 42. VENING MEINESZ (F.-A.), UMBGROVE (J.-H.-F.) et KUENEN (P.-H.). — Gravity expeditions at sea 1923-1932, vol. 2. — *Netherlands Geodetic Commission*, Delft, 1934.
 43. VINGIENNE (H.). — Un type de décollement dans le Jura méridional au Nord de Chésery (Ain). — *Bull. Lab. Géogr. phys. Géol. dynam. Univ. Paris*, 5, 1932.
 44. WAEBER (M.). — Observations faites sur le glacier de Trélatête à l'occasion de l'aménagement d'une prise d'eau sous-glaciaire. — *Trav. Lab. Géol. Univ. Grenoble*, 24, 1944.
-

Explication de la planche I.

Cette planche illustre les analogies entre les structures ducs à l'écoulement par gravité, d'une part dans un glacier, d'autre part dans la masse schisteuse homogène du « Flysch à Helminthoides » de la nappe de l'Embrunais. Déjà bien vues par O. MENGEL (Perpignan) et par J. BROCHEREL (Aoste), ces analogies ont été soulignées avec beaucoup d'insistance par R. K. CHAMBERLIN (8).

A. — Cette photographie, autrefois publiée par J. BROCHEREL (6), est reproduite ici avec l'aimable autorisation de l'auteur, que je remercie bien vivement.

Le front du Glacier de la Brenva (versant italien du Mont-Blanc), montre une schistosité ou « pseudo-stratification » très nette, accusée par des alternances de minces zones de glace bleue compacte avec des bandes plus épaisses de glace blanche granuleuse.

Des photographies tout à fait analogues viennent d'être publiées par Robert P. SHARP (The Wolf Creek glaciers, St. Elias Range, Yukon territory, *Geogr. Rev.*, 37, New York 1947), qui les commente ainsi : « L'origine de cette structure rubanée a été très discutée; actuellement on s'accorde à y voir des surfaces de glissement, le long desquelles la glace a été recristallisée; rien n'indique que cette structure rubanée ait un rapport quelconque avec la stratification des névés supérieurs. »

A ces écoulements différentiels laminaires est venu s'ajouter un écoulement d'ensemble tourbillonnaire, manifesté par des plissements et des charnières dont l'une est bien visible au bas de la photographie.

B. — La paroi rocheuse, haute de 1200 mètres, est formée uniquement par des alternances de schistes et de lits grésocalcaires du « Flysch à Helminthoides »; elle est orientée vers le Sud et donne ainsi une coupe transversale de la « nappe du Flysch de l'Embrunais », qui s'est écoulée vers l'Ouest.

Mais ici ces alternances témoignent d'une véritable stratification primitive : le rôle de l'écoulement laminaire, très réduit, s'est borné à donner la structure schisteuse aux intercalations marneuses qui séparaient les lits durs grésocalcaires, lesquels n'ont été ni tronçonnés, ni déformés.

En revanche, l'écoulement d'ensemble tourbillonnaire se traduit par un empilement de plis couchés jusqu'à l'horizontale, mais dont les charnières sont rarement discernables : l'une d'elles, très régulière, se dessine nettement dans la partie inférieure de la paroi.