

www.e-rara.ch

Etudes sur l'histoire de la terre et sur les causes des révolutions de sa surface

**Boucheporn, Félix de
Paris, 1844**

ETH-Bibliothek Zürich

Shelf Mark: Rar 1140

Persistent Link: <https://doi.org/10.3931/e-rara-22523>

Chapitre II. Des montagnes, de leurs théories, et des conditions dynamiques de leur soulèvement.

www.e-rara.ch

Die Plattform e-rara.ch macht die in Schweizer Bibliotheken vorhandenen Drucke online verfügbar. Das Spektrum reicht von Büchern über Karten bis zu illustrierten Materialien – von den Anfängen des Buchdrucks bis ins 20. Jahrhundert.

e-rara.ch provides online access to rare books available in Swiss libraries. The holdings extend from books and maps to illustrated material – from the beginnings of printing to the 20th century.

e-rara.ch met en ligne des reproductions numériques d'imprimés conservés dans les bibliothèques de Suisse. L'éventail va des livres aux documents iconographiques en passant par les cartes – des débuts de l'imprimerie jusqu'au 20^e siècle.

e-rara.ch mette a disposizione in rete le edizioni antiche conservate nelle biblioteche svizzere. La collezione comprende libri, carte geografiche e materiale illustrato che risalgono agli inizi della tipografia fino ad arrivare al XX secolo.

Nutzungsbedingungen Dieses Digitalisat kann kostenfrei heruntergeladen werden. Die Lizenzierungsart und die Nutzungsbedingungen sind individuell zu jedem Dokument in den Titelinformationen angegeben. Für weitere Informationen siehe auch [Link]

Terms of Use This digital copy can be downloaded free of charge. The type of licensing and the terms of use are indicated in the title information for each document individually. For further information please refer to the terms of use on [Link]

Conditions d'utilisation Ce document numérique peut être téléchargé gratuitement. Son statut juridique et ses conditions d'utilisation sont précisés dans sa notice détaillée. Pour de plus amples informations, voir [Link]

Condizioni di utilizzo Questo documento può essere scaricato gratuitamente. Il tipo di licenza e le condizioni di utilizzo sono indicate nella notizia bibliografica del singolo documento. Per ulteriori informazioni vedi anche [Link]

CHAPITRE II.

DES MONTAGNES, DE LEURS THÉORIES, ET DES CONDITIONS DYNAMIQUES DE LEUR SOULÈVEMENT.

Dès l'origine de la géologie rationnelle, ce qui excita le plus vivement l'ardeur des recherches systématiques fut la cause inconnue de l'élévation des continents et des montagnes au-dessus du niveau des mers. La présence des coquilles fossiles signalée à des hauteurs prodigieuses dans presque tous les massifs montagneux, faisait reconnaître comme un fait général l'action de la mer sur ces terrains maintenant si élevés au-dessus d'elle; et ce problème fut le premier qui exerça l'imagination des géologues et qui divisa leurs opinions.

Je ne parlerai pas des rêveries diluvianistes qui prétendaient tout expliquer par une irruption de l'Océan, ni d'autres idées plus étranges qui ont signalé l'enfance de la géologie : elles appartiennent à une époque où l'esprit humain, enveloppé encore dans les langes scolastiques, s'essayait à d'impuissantes conceptions pour expliquer des faits que l'on ne savait pas observer. Dans le courant du 17^e siècle Fracastoro, Stenon en Italie, Bernard Palissy en France, Hooke en Angleterre, le grand Leibnitz en Allemagne jetèrent les fondements d'une plus saine géologie : Stenon surtout, le premier qui ait attribué à des mouvements du sol les inflexions des strates et qui ait distingué ces mouvements en diverses périodes, posant ainsi les deux grandes bases de la géologie moderne, à savoir la classification des terrains par ordre d'âge, et la théorie de leurs soulèvements successifs.

S'il ne fût pas donné à ces grands esprits d'arrêter pendant

leur tems la ferveur des diluvianistes, ils portèrent du moins les idées des savants vers l'observation, et préparèrent les voies aux belles études du siècle suivant, auquel Lazzaro Moro, Buffon, Werner, Hutton, Pallas, Saussure, Dolomieu attachèrent la gloire de leurs travaux. L'étude pratique des montagnes n'a toutefois réellement commencé qu'à Saussure et Pallas.

J'aurais voulu qu'il ne fût pas trop étranger à mon sujet de témoigner ici par quelques mots le culte particulier que j'ai voué au premier de ces deux naturalistes : hommage d'admiration qui s'adresse au grand peintre aussi bien qu'au grand observateur. Saussure en effet dans le simple récit de ses voyages scientifiques dans les Alpes, évoque à nos yeux la grande nature avec une puissance de vérité que la science seule ne donne pas, et qui réside autant peut-être dans les facultés de l'âme que dans celles de l'intelligence. En nous conduisant avec lui au travers des montagnes, dont nul n'a gravi les cimes avec plus de courage et de patience, non-seulement il nous en dévoile la structure, mais il nous les fait aimer ; et l'on ne sait ce qui nous frappe davantage ou de la naïve grandeur de ses récits ou de la netteté de ses aperçus scientifiques. Il fut l'un des premiers et le premier peut-être qui dans l'étude de ces grands accidents ait fait marcher la connaissance des détails avant les considérations d'ensemble, en un mot qui ait subordonné la théorie à l'observation et à l'observation complète : sage réserve, utile temporisation, que l'impatience des esprits n'a pas toujours imitée, et ne peut pas toujours imiter peut-être. Mais revenons aux théories.

Dès qu'il fut reconnu par la plus grande partie des géologues que les terrains inclinés avaient été dérangés de leur position primitivement horizontale, conclusion que les judicieuses remarques de Saussure ne contribuèrent pas peu à établir définitivement, les opinions se trouvèrent divisées entre deux hypothèses sur lesquelles semblait se résumer toute la série du possible : la théorie des *affaisements* et celle des *soulèvements*.

Deluc a spécialement attaché son nom à la première, dont

les traces se rencontrent déjà dans quelques idées de Sténon. Deluc, dans l'effort original mais trop purement imaginaire de sa pensée, semblait avoir pris à tâche d'intervertir par tout le sens apparent des phénomènes : d'une part à l'inverse des vulcanistes, il ne considérait la fluidité primitive du revêtement terrestre que comme un fait de seconde origine, le résultat d'une influence extérieure, et il en bannissait l'action du feu; d'autre part, pour que le contraste fût complet, il élevait les montagnes par abaissement. Selon lui la lumière, à la voix de Dieu, pénétrant des atomes incohérents, matière première du globe, en aurait formé l'eau et par suite le premier revêtement compact déposé par cristallisation au milieu de ce fluide. Puis les eaux s'engouffrant, par des fractures de l'enveloppe, dans la masse incohérente des *pulvicules* intérieures, aurait produit d'immenses affaissements et de là des mouvements de bascule qui relevaient les arêtes montagneuses par contre-coup de l'abaissement des vallées. Il serait, je pense, bien inutile de discuter aujourd'hui les principes de ce système, dépourvu de chimie et de toute recherche analytique positive : je suis loin toutefois, comme quelques-uns, d'en dédaigner l'originalité. Mais il faut bien le dire, il paraît plus que difficile que ses résultats parviennent jamais à se placer au niveau des faits et au-dessus de l'atteinte des objections fondamentales. Abaisant les plus vastes régions de la surface du globe pour maintenir le niveau de quelques arêtes étroites, et plaçant ainsi les plus grands dérangements dans le fond des vallées et dans les plaines, contre l'observation formelle, cette hypothèse marche ainsi à l'encontre de toute vraisemblance géologique; elle y échappe plus encore en nécessitant un vaste abaissement du niveau des mers pour expliquer la saillie des plateaux à couches horizontales, abaissement que rien ne peut justifier et que l'étendue relative de la surface des eaux rend même impossible à concevoir. Si tous ces arguments n'accusaient pas encore avec assez d'énergie la vraisemblance de l'hypothèse des affaissements, il faudrait ajouter qu'inhabile d'une part à expliquer toutes les allures anormales des couches relevées,

telles que leurs contournements et la verticalité fréquente sur les sommets, elle l'est encore davantage à expliquer au contraire tout ce qu'il y a de régulier dans la structure des montagnes et dans les inflexions rectilignes des terrains.

Cette opinion a été toutefois reproduite de nos jours, avec cette même clause d'un abaissement progressif du niveau général des eaux; mais par une sorte de compromis avec les idées universellement admises aujourd'hui sur la chaleur centrale du globe, on a substitué aux cavernes intérieures la contraction hypothétique que le refroidissement fait subir à la masse interne de la terre. La théorie des affaissements perd ainsi son premier caractère et rentre en grande partie dans l'ingénieuse hypothèse de M. E. de Beaumont dont il sera parlé ci-après; mais en s'attachant à conserver l'abaissement des mers comme conséquence de la contraction interne, cette nouvelle théorie des affaissements impliquerait, vu le grand excès de leur surface, des effondrements trois fois plus considérables que la hauteur de nos montagnes et par là-même une contraction véritablement fabuleuse du noyau terrestre, depuis une époque où la température ne pouvait être très différente de ce qu'elle est aujourd'hui.

L'hypothèse *des soulèvements*, en contraste avec la précédente, a pour principal caractère de maintenir immobile le niveau des mers et la plus grande portion de l'écorce du globe, pour faire élever successivement au-dessus d'elles, par une puissance qui a été diversement définie, les continents et les montagnes. Cette hypothèse paraît se prêter infiniment mieux que celle des affaissements à tout le caprice des inclinaisons dans les terrains relevés et laisser plus de latitude aussi dans la recherche des causes régulières. Cependant lorsqu'on examine attentivement la structure des terrains et des chaînes de montagnes; lorsque, sans se contenter d'une vue générale, on entre dans les détails de leurs accidents, on s'aperçoit que le problème est infiniment plus compliqué que la théorie ne le suppose, et qu'il est loin de pouvoir se traduire par une action aussi simple qu'un soulèvement de bas en haut.

Aussi la marche de la science dans les différentes phases de

cette théorie présente-t-elle un curieux sujet d'études : à mesure que grandissait l'observation, on a vu les idées se modifier et la recherche des causes se compliquer peu à peu. Les premiers promoteurs de ce système, absorbés par l'idée de la hauteur où sont portés les sommets des montagnes et les ayant d'ailleurs peu observées, n'ont vu d'abord d'autre cause active de leur élévation que le boursofflement accidentel causé par la chaleur intérieure : ils ont personnifié comme principe l'action volcanique, mais sans l'analyser ni la définir. Stenon qui le premier parmi les modernes appliqua aux phénomènes géologiques l'idée systématique des mouvements du sol, Stenon n'imagina pas autre chose que des élévations et dépressions successives par la force des vapeurs et par l'effondrement de cavernes souterraines ; près d'un siècle plus tard lorsque Lazzaro Moro¹ renouvela une théorie analogue en prenant pour exemple l'élévation récente d'une île volcanique dans l'archipel de Grèce, ce fut toujours sur un simple phénomène d'exhaussement par les forces souterraines qu'il fonda ses explications ; et tous les géologues qu'on appela depuis *vulcanistes* s'accordèrent à invoquer l'action expansive des gaz et la force volcanique comme cause unique de l'exhaussement des terrains et de leurs dérangements².

Ce furent les observations de Saussure dans les Alpes, un peu antérieures aux travaux de Hutton, qui portèrent pour la première fois l'attention des savants sur un genre de phénomène d'une haute généralité géologique, absolument incompatible avec la simplicité des théories précédentes. Ce grand observateur qui dans ses pérégrinations alpestres porta un coup-d'œil si lucide sur la disposition des couches, fut frappé de leurs vastes contournements dans ces montagnes, et des changements brusques et multipliés de leurs pentes mis en contraste avec la régularité générale de leurs directions. Ces phénomènes si remarquables lui inspirèrent l'idée de grandes forces latérales, et c'est cette idée qu'il exprimait par le mot de

¹ En 1740.

² Voir Breislak, *Introduction à la géologie*.

refoulement, qu'il a créé comme expression géologique. Admirable dans l'étude des faits, mais extrêmement prudent dans la recherche des causes, parce qu'il avait trop de portée dans l'esprit pour hasarder une idée médiocre, Saussure ne paraît pas avoir exprimé de conjectures positives sur l'agent de ce refoulement, de cette vaste compression; il sentait sans doute combien il manquait encore à la science de son époque. Mais l'idée n'en est pas moins remarquable par sa justesse et par la lucidité avec laquelle elle donne l'image des phénomènes.

Hutton, vers le même tems, observant aussi en Ecosse les contournements des couches, mais les reliant à l'intrusion apparente des trapps, des basaltes, des granits même, conçut la première idée de l'influence qu'aurait exercée la poussée de ces roches ignées sur la structure des terrains sédimentaires. Porté par la nature et le cadre ordinaire de ses observations à envisager les phénomènes physiques sous un point de vue moins large que Saussure, et disposé sous ce rapport à donner une plus grande importance aux causes locales, Hutton attribuait à une action de ce genre, essentiellement bornée, le contournement des couches. S'il eût étudié la nature dans une contrée où elle put se montrer à lui dans toute la majesté de ses accidents, peut-être la grandeur des phénomènes lui eût-elle inspiré d'autres idées. Quoi qu'il en soit on lui doit cependant d'avoir porté son attention sur la nécessité des forces latérales dans le fait du relèvement des couches, bien que l'esprit de système lui ait fait restreindre cette action dans les limites d'un cercle trop borné ¹.

Sir James Hall, un des amis de Hutton qui a donné le plus

¹ Voici en effet ce qu'écrivait son commentateur Playfair (*Explication sur la théorie de la terre de Hutton*): « Quoique la première direction de la force qui a ainsi élevé les couches ait dû agir du bas en haut, cependant elle a été combinée avec la gravité et la résistance des masses de manière à donner un choc *latéral* et oblique, et à produire toutes les contorsions qui, sur une grande échelle, se comptent parmi les phénomènes les plus curieux et les plus instructifs de la géologie. »

d'appui à ses grandes idées, fit de ces phénomènes de contournements par compression une belle étude expérimentale : il en matérialisa les effets par un mécanisme ingénieux, qui est décrit dans tous les traités théoriques, et qui consiste à faire presser par deux forces contraires, dans le sens de leur direction, une série de bandes flexibles superposées, sur lesquelles pèse un poids suffisant pour mettre obstacle à leur élévation par infléchissement. Les contorsions qui résultent de cette double action dans les bandes superposées imitent parfaitement les ondulations des couches dans les terrains bouleversés.

Il fallut désormais tenir compte de ces faits, d'une nature si spéciale, dans l'étude des causes qui ont produit la structure des montagnes; l'action des gaz et toute force simplement éruptive étant complètement inhabile à les expliquer, on en vint dès-lors à délaisser comme insuffisantes les idées des premiers vulcanistes et à considérer l'émersion des roches ignées elles-mêmes comme l'agent principal du bouleversement des couches, ce qui forme le caractère distinctif de la théorie moderne des soulèvements ignés.

On attribua donc l'élévation des montagnes, et même celle des masses continentales au surgissement des porphyres, selon les premières idées de M. de Buch, à celui des granits, aux roches dioritiques ou serpentineuses, enfin à toutes celles qui offraient dans leur composition plus ou moins d'analogie avec les produits actuels des volcans, que nous voyons cependant s'écouler seulement par les bouches ouvertes des cratères ou par les fractures qui s'y produisent, sans aucune apparence de pression latérale. Quant à la force qui avait soulevé à divers intervalles ces masses incandescentes et les avait lancées en guise de béliet contre le faible revêtement du globe, sa cause restait dans un vague profond, attribuée tantôt à un problématique dégagement de vapeurs, tantôt à une dilatation interne tout aussi problématique¹, tantôt à une contraction même de l'écorce solide de la terre.

¹ Je dis problématiques comme agents universels, car je suis loin, comme on le verra, de révoquer en doute l'action des gaz et de la dilatation dans le phénomène volcanique restreint à de justes limites.

Mais lorsqu'une observation attentive est dirigée vers ce but spécial, de constater les relations mutuelles des roches massives ou ignées, avec les terrains sédimentaires, on est forcé de restreindre singulièrement la subordination des contournements des couches à la sortie de ces roches éruptives, sous peine de destituer les grands mouvements du sol de leur plus précieux caractère de généralité et d'en confondre la régularité universelle avec le simple caprice de phénomènes purement locaux.

On est frappé en effet de remarquables contrastes dans les relations mutuelles dont nous parlons; ils peuvent se résumer dans ce simple mais important énoncé, « que les dérangements des terrains stratifiés se coordonnent à des *lignes*, qu'ils se rapportent, sauf quelques irrégularités de détail, à de grandes lois de direction, tandis que les roches massives sont disposées par *points* ou par masses isolées. » Cette propriété des couches ondulées de donner toujours dans leur section horizontale une série de lignes droites qui se prolongent sur de grands espaces, cette propriété, quoique remarquée depuis longtemps (car c'est là le principe des *directions* en géologie), ne paraît cependant avoir été appréciée à sa juste valeur et suivie jusqu'aux conséquences qui dérivent immédiatement de sa généralité, que dans ces derniers tems, où elle a été prise pour base d'un remarquable système dont nous parlerons bientôt avec tout l'intérêt qu'il commande. Je ne sais cependant si l'éruption des roches ignées y a été considérée comme un phénomène assez distinct : pour moi je pense que le principe des directions la rend absolument indépendante des grands ridements du sol, et cette opinion que je ne fais qu'indiquer ici ressortira, je l'espère, avec quelque évidence de l'étude séparée des deux phénomènes qui sera faite par la suite.

On sait, et toute la géologie connue en fait foi, que les roches ignées telles que porphyres, serpentines, diorites, variolites, trapps, basaltes, lorsqu'elles se rattachent à quelque chaîne de montagnes, ne s'y montrent qu'en masses très limitées par rapport aux grandes lignes montagneuses; le plus souvent elles n'apparaissent point sur leur crête, mais disper-

sées le long de leur pied : tantôt associées aux couches elles sont englobées dans leurs grandes directions ; tantôt étrangères à leurs directions mêmes elles remplissent seulement, sans les déranger, les fractures qui les traversent, ou se répandent en nappes au-dessus d'elles ; tantôt enfin l'inclinaison des couches leur paraît il est vrai subordonnée, mais cette liaison est purement locale, elle ne se continue pas au loin : et les cônes éruptifs n'ont soulevé que le manteau de terrains qui les enveloppe immédiatement. Tels sont les faits qu'ont rendus évidents l'étude des porphyres en général, et en particulier des porphyres de Norwège (dont M. de Buch a signalé le premier la superposition à des calcaires) ; celles des filons trapéens et basaltiques des terrains houillers d'Angleterre ; celle des ophites dans les Pyrénées, des variolites et spilites dans les Alpes, des serpentines dans l'Apennin, l'Oural, des basaltes en Saxe et en tant d'autres contrées. Ces faits en un mot sont devenus vulgaires en géologie. Partout ces roches ignées que je pourrais nommer accidentelles, sont ou isolées ou au moins indépendantes, malgré l'alignement général des terrains. Si cependant leurs masses diverses semblent coordonnées aussi quelquefois à des alignements partiels ce n'est pas tant à ceux des couches qu'elles se rapportent, qu'à des fractures qui leur ont donné passage et dont le parallélisme mutuel tend même à indiquer l'antériorité, car il n'est guère vraisemblable que cette propriété du parallélisme puisse appartenir au bouillonnement d'une matière en ignition.

Le granit seul par la grande étendue de ses masses et par la dépendance habituelle des terrains enveloppants, semble parmi les roches ignées se soustraire à cette loi d'isolement ; mais ce n'est qu'une apparence, que vient détruire une étude suffisamment étendue. La subordination presque constante des terrains qui entourent le granit et qui semblent si souvent (mais non toutefois sans exception) s'appuyer de toutes parts sur ses masses, cette subordination, résultat de soulèvements locaux, est un fait à part qui se lie à l'origine même du granit, ainsi que nous l'exposerons plus loin dans une théorie nouvelle ; mais ces soulèvements sont essentiellement limités, isolés

même, et n'ont qu'un rapport très secondaire avec les grandes directions des chaînes. Le granit occupe le plus souvent des espaces arrondis ou ovoïdes, sans liaison immédiate avec des développements linéaires; il est comme jeté çà et là, par vastes cônes, fréquemment hors de l'axe réel de la chaîne, comme le montrent la Maladetta, Néouvielle dans les Pyrénées, le Mont-Blanc dans les Alpes. Palassou a remarqué il y a longtemps que la direction générale des couches dans les Pyrénées n'est nullement interrompue par les massifs irréguliers de granit, qui y semblent comme englobés (sans doute parce que le dernier soulèvement de la chaîne est postérieur à leur apparition). Plus récemment un savant professeur de Christiania, M. Keilhau, a mis en évidence l'allure semblable des granits de Norwège : les schistes anciens des environs de Christiania, dit-il, plongent invariablement au N. N. O, quelle que soit l'irrégularité des contours du granit sur lesquels ils s'appuient. Enfin les granits des aiguilles du Mont-Blanc s'associent, d'après Saussure, par la direction de leurs vastes feuillets, avec celle des terrains qui les environnent.

Une autre raison péremptoire défendrait, à défaut d'autres motifs, d'attribuer aux soulèvements plutoniques les ploiements des terrains dans les montagnes, c'est la disproportion qui existe entre l'amplitude de développement des terrains ployés et l'étendue des roches ignées qui auraient pu produire leur refoulement. Si je prends les Alpes pour exemple, le granit, suivant M. Escher, ne forme pas le dixième de la surface de ces montagnes : or si l'on développait sur un plan horizontal tous les ploiements dont elles sont formées, ce serait bien peu de dire que leur *surface* deviendrait double de ce qu'elle est aujourd'hui. Le granit d'ailleurs y est généralement antérieur aux derniers soulèvements que la chaîne a subis, puisqu'on rencontre ses débris dans la molasse, qui s'élève au Righi à plus de 1.800 mètres.

Il est inutile d'insister davantage sur ce sujet des roches ignées, que l'observation générale des faits tend chaque jour à isoler davantage. On verra par la suite combien, dans notre opinion, sont éloignés de la vérité ceux qui supposent une re-

lation de dépendance entre le soulèvement des chaînes et le phénomène volcanique, phénomène isolé et dépendant lui-même s'il en fut. Sans nous arrêter même à cette idée qu'il existe des massifs montagneux, comme le Jura, qui ne renferment aucune trace notable de roches ignées, nous allons dans un examen plus spécial de la structure des chaînes chercher des preuves de leur indépendance, et le droit de considérer leur élévation comme un phénomène à part, exigeant des forces spéciales qui auraient agi avec régularité sur de vastes étendues et même, comme nous le verrons plus tard, sur des étendues sans limites.

Il y a deux choses à considérer dans le surgissement des montagnes, deux mouvements d'un ordre différent qui tous deux ont concouru, quoiqu'inégalement, à porter leurs sommets à la hauteur que nous leur voyons atteindre. L'un, de beaucoup le principal, est celui par lequel les couches des terrains déviées de leur horizontalité primitive et exhaussées par inflexion, ont été redressées sur le flanc des montagnes ou contournées autour de leurs sinuosités : c'est là le phénomène caractéristique de soulèvement. L'autre mouvement consiste en des ruptures brusques et nettes, suivant des *plans* qui approchent plus ou moins d'être verticaux, et qui s'alignent entr'eux par groupes parallèles ; ces ruptures sont caractérisées par l'apparence du glissement vertical de l'une des portions du terrain sur la portion contigue, sans que le plus souvent la stratification générale et l'inclinaison des couches soit affectée par ce mouvement : ce sont les failles.

Les failles, dont on n'a jusqu'ici tenu qu'un compte très médiocre en géologie, n'ont à la vérité d'effet réel sur la structure générale des terrains que par la différence de niveau qu'elles peuvent produire, isolément ou par séries : mais nous ferons voir plus tard qu'il existe même dans ces différences une sorte de compensation, de sorte qu'en définitive les failles n'ont ordinairement que peu d'influence sur la figure extérieure des montagnes. En considérant toutefois cet ordre de modifications dans quelques-uns de ses traits caractéristiques peu étudiés jusqu'à ce jour, nous en déduirons bientôt des

données théoriques importantes. Mais cette étude mérite d'occuper une place spéciale; nous nous attacherons donc uniquement ici au phénomène de l'inflexion des couches, qui à vrai dire fournit tous les grands traits de la structure apparente des montagnes.

Les deux phénomènes dont je viens de parler, les failles et la flexion des terrains, appartiennent à deux genres de forces bien distinctes, quoiqu'elles aient agi simultanément: dans les failles on doit reconnaître le résultat évident d'un mouvement vertical; dans la flexion au contraire agit une force d'un ordre tout différent.

Les montagnes en effet, considérées dans les traits les plus généraux de leur structure, représentent bien moins le brisement d'une enveloppe rigide par une force d'éruption intérieure, que le plissement successif d'une matière flexible par une compression *horizontale* agissant à la fois sur de vastes étendues. Tel est le théorème important, fondamental, dans lequel nous paraît se résumer l'étude attentive de ces grands accidents; principe fécond d'ailleurs et qui mérite, par la grandeur et la généralité de sa portée, de former la principale base des théories qui cherchent à remonter aux causes des révolutions terrestres.

Ce principe a déjà été introduit dans la science et rattaché théoriquement à un remarquable système¹; cependant il semble que dans l'opinion il lui reste quelque chose encore de conjectural. Pour moi je le crois susceptible d'une sorte de démonstration fondée sur l'ensemble des faits que présente la structure habituelle des chaînes, et cette considération est trop importante à mon point de vue pour que je m'abstienne d'en assurer les bases.

C'est, comme je l'ai déjà rappelé, une des propriétés les plus caractéristiques des soulèvements des terrains, que la surface des couches infléchies puisse être partout considérée comme engendrée par le mouvement d'une droite *horizontale*,

¹ Celui de M. Elie de Beaumont.

qui suivrait, parallèlement à elle-même, le contour d'une courbe perpendiculaire à l'horizon. Un semblable caractère ne saurait appartenir, disons-le tout d'abord, qu'au résultat de forces qui auraient agi horizontalement, car si l'on voulait faire intervenir des forces de soulèvement vertical, il faudrait supposer qu'elles ont agi partout avec une égale intensité : or on sent combien cette dernière supposition serait éloignée de toute probabilité rationnelle.

Indépendamment de cette propriété de l'alignement horizontal, les grandes études géologiques ont montré la persistance de ces alignements dans une même direction sur de vastes étendues, et dans le sens transversal elles ont mis en évidence le parallélisme des directions sur toute la largeur des massifs de soulèvement, considérés dans des limites convenables. De là résultent ces longues lignes montagneuses qui dans leur prolongement géographique embrassent souvent d'un seul trait des portions notables du contour de la sphère. Si l'on fait abstraction de quelques irrégularités accidentelles¹ provenant d'éruptions locales ou du croisement des directions, l'observation vient montrer avec évidence que le soulèvement de ces grandes masses alignées concorde avec des faisceaux de direction géologiques parallèles, affectant l'ensemble des couches relevées.

Mais si maintenant l'on vient à mettre en regard de cette constance dans les directions contigues sur de longs espaces la manière d'être des couches relativement à leurs pentes et aux variations de leurs angles avec l'horizon, le contraste le plus absolu se présente alors à l'observateur : il semble que l'irrégularité, dont la direction des couches est affranchie, s'est réfugiée tout entière dans leur inclinaison. Si on les observe dans des coupes transversales à l'axe de chacune des chaînes, on les voit penchant d'abord vers un certain point de l'horizon se replier bientôt pour prendre l'inclinaison opposée, et des

¹ « Il ne faut point, disait Saussure, observer les montagnes avec un microscope », et je n'ajoute pas quel prix avait un tel mot sous la plume de ce grand maître en observation.

contournements semblables se succéder pour ainsi dire d'une manière indéfinie, avec toutes les variations possibles dans les pentes et dans les courbures. Les couches infléchies forment ainsi, dans tout l'intervalle où une même direction les affecte, une suite d'ondulations cylindroïdes à génératrice horizontale, dont la courbe directrice se replie en mille sinuosités dans un plan perpendiculaire à l'horizon et à la direction des chaînes : imitant ainsi dans leur ensemble les rides ondulées de la surface des eaux, soulevée par le souffle horizontal des vents; ou plus exactement cette série de ploiements à courbures inverses coordonnées à des axes parallèles serait reproduite dans le froissement longitudinal de bandes flexibles pressées par deux forces contraires, comme le réalise l'expérience de Hall; et lorsqu'appliquant instinctivement cette idée à l'ensemble des montagnes on les appelait les ridements de l'écorce du globe, on ne pouvait leur attribuer une dénomination plus heureuse et plus vraie.

C'est vers l'axe central des chaînes que les ondulations des terrains se présentent dans leurs proportions les plus colossales; mais elles ne sont pas dévolues exclusivement à ces régions élevées, on les retrouve partout, et il n'y a point de phénomène plus général en géologie : ainsi les plaines de la Flandre et du Hainaut recouvrent les plissements les plus extraordinaires, ceux du terrain houiller de Mons et d'Anzin, qui se dirigeant régulièrement de l'E. à l'O. sur plus de quarante lieues d'étendue, présente dans son inclinaison les ploiements en retour, si multipliés et si bizarres, que l'on a tant de fois cités; et il est dès longtemps reconnu qu'une pareille forme ne saurait résulter que d'une pression horizontale. Les basses collines des Ardennes et de la Bretagne ne présentent non plus dans leurs terrains schisteux qu'un ensemble de plis et de contournements; enfin la chaîne calcaire du Jura, d'élévation moyenne, n'est autre chose qu'une série de grandes ondulations arrondies, dont les observateurs, dans leur préoccupation de la théorie des soulèvements par éruption, ne semblent avoir signalé que les arceaux droits ou convexes, faisant abstraction des conca-

vités qui les relient souterrainement et font de cette chaîne si instructive un seul tout, soulevé en masse, quoiqu'à divers intervalles, et amené à son relief actuel par une série de refoulements horizontaux agissant à la fois sur tout l'ensemble du massif.

Mais pour constater la généralité de ce mode d'action des forces de soulèvement, il faut entrer dans quelques détails plus précis qu'on ne l'a fait encore sur les formes de structure habituelle dans les hautes crêtes, car c'est là que l'action principale du soulèvement a dû s'exercer. Afin de parler aux yeux par un exemple, j'ai pris dans la chaîne de montagnes qui m'est le mieux connue, celle des Pyrénées, une coupe ¹ qui n'avait pas encore été donnée dans son ensemble, et qui m'a paru présenter, au milieu d'une assez remarquable série d'inflexions, les principaux types de structure que je crois essentiel de signaler, en recherchant leurs causes dynamiques. Cette coupe, plutôt physique que géologique, car elle renferme des terrains peu variés, s'étend sur un espace d'environ 40,000 mètres et représente la section du versant nord des Pyrénées, entre le sommet de la Maladetta (point culminant de la chaîne) et la jonction de la vallée de la Garonne avec celle de Luchon, dans la plaine de Saint-Béat. Dans cet intervalle on ne rencontre que du granit, des schistes et calcaires ² de transition, et enfin du marbre blanc dont la formation est bien distincte et qui paraît appartenir au terrain jurassique modifié par les éruptions ignées. C'est sans doute au ramollissement dû à cette chaleur intérieure qu'il faut attribuer les formes de ploiement si remarquables qui se montrent dans les calcaires de l'extrémité N. de notre coupe. Palassou avait déjà cité quelques détails de ces formes si curieuses dans son essai sur la minéralogie des Pyrénées, mais il l'a fait d'une manière très peu complète, et sans les rattacher à aucune donnée d'ensemble; j'ai

¹ Planche 1^{re}.

² Marbre rouge et vert, à Nautilus.

pensé que la physionomie générale de ces terrains pouvait être d'un utile enseignement. Certes à la vue de ces puissantes couches calcaires pliées en S et si fortement raccourcies dans le sens horizontal, personne n'aura l'idée qu'une semblable modification puisse dériver d'une force de bas en haut. Lorsque l'on voit ensuite ces ploiments se continuer sur toute la largeur de la chaîne et que l'on en compare l'intensité avec la petite masse des granits qui viennent poindre çà et là, la disproportion qui apparaît exclut bien clairement l'éruption des causes de ce phénomène. Si l'on développait en effet sur un plan horizontal toutes ces couches reployées, dont nous ne pouvons même sonder les plus grands plis dans toute leur profondeur, quelle étendue n'occuperaient-elles pas? Et sera-t-il trop hardi de croire que la largeur transversale de la chaîne pourrait en être doublée? Or les saillies granitiques que l'on y voit çà et là surgir ne sont rien en comparaison de cette étendue. Par quel phénomène d'ailleurs, si le surgissement de ces montagnes provenait d'un écartement par éruption, verrait-on la masse des couches se concentrer vers la partie centrale, où elles se dressent verticalement sur une grande hauteur et par conséquent s'y entassent en plus grande proportion sur le moindre espace? C'est qu'en effet la force qui a soulevé les montagnes est diamétralement opposée, dans son résultat, à l'idée d'écartement : c'est une pression au contraire, et une pression qui pour concentrer son action vers l'axe central a dû s'exercer symétriquement de part et d'autre, par deux efforts opposés. La structure des ploiments eux-mêmes va du reste nous l'indiquer avec plus d'évidence encore.

Dans la série des contournements qui se trouvent figurés dans cette coupe, diverses formes sont à remarquer : en premier lieu la forme voutée sans rupture, qui offre cette circonstance remarquable, de faire occuper aux couches enveloppantes une plus grande étendue relative qu'elles n'en occupaient dans la disposition horizontale. Elle indique évidemment un glissement des couches l'une sur l'autre, directement contraire à l'idée d'un soulèvement intérieur, ou bien elle nécessite un état de mollesse qui leur permettait de s'étirer et de se distendre :

mais un pareil effet ne saurait se rapporter à une force verticale qu'autant que l'extension aurait eu lieu à la partie culminante de chaque voute, et il exige une force toute différente lorsque l'allongement du pli est vertical au contraire et qu'il y a eu concentration à sa partie supérieure, au lieu d'une distension ou d'un déchirement. La conception d'une pression extérieure à composante horizontale devient encore ici de toute nécessité, et la même conclusion s'applique au cas où les couches sont disposées sous forme de chevrons archoutés ou de lambda suivant l'expression de Saussure (Pl. II, fig. 3), ou bien sous la forme inverse, celle du V. Toutes ces allures, dans lesquelles se résument une si grande partie des ondulations montagneuses ¹ ne sauraient dériver que d'une compression.

Mais il est une disposition des couches inclinées qui plus que toute autre est propre à constater l'action exclusive des forces horizontales; sa considération est de la plus grande importance parce qu'elle est de beaucoup la plus habituelle dans l'axe même des chaînes et dans leurs massifs culminants, et qu'ainsi tout mode d'action qu'elle excluera n'aura pu jouer un grand rôle dans leur structure et devra être exclu des causes générales du soulèvement. La disposition dont je parle est celle en vertu de laquelle les couches divergeant symétriquement sur l'un et l'autre versant d'une montagne, sont verticales sur le sommet: structure observée depuis longtemps et que l'on a désignée par le nom très expressif de *structure en éventail*. Elle admet deux modes différents, selon que les couches divergentes penchent de part et d'autre vers l'intérieur de la montagne ², ou qu'elles sont en appui sur ses pentes ³. On pourrait nommer ces deux variétés: structure en éventail *droit* et en éventail *renversé*. C'est en elles que semble se ré-

¹ Les monts Ourals, au dire des ingénieurs russes, présentent souvent la forme de chevrons sur quarante lieues d'étendue consécutive. Elle est très fréquente dans tous nos terrains schisteux.

² Pl. II, fig. 1.

³ Pl. I, au port de Vénasque, et Pl. II, fig. II.

sumer la disposition habituelle des couches dans les hautes crêtes qui forment l'axe de nos grandes chaînes. Elles existent pour ainsi dire dans toute l'arête centrale des Pyrénées, c'est-à-dire dans cette longue suite de crêtes presque toujours schisteuses qui depuis les sources de l'Ariège jusqu'au Pic du Midi de Pau forme la limite de la France et de l'Espagne et constitue l'axe réel de la chaîne, bien que plusieurs des points culminants se trouvent un peu en dehors d'elle¹. Dans les grandes Alpes les mêmes formes caractérisent les principaux massifs, celui du Saint-Gothard, du Mont-Blanc, du Schreckhorn et du Finsteraarhorn etc. En un mot la combinaison de forces qui a pu produire cette structure a marqué son empreinte dans les plus grands traits du relief montagneux qui nous entoure.

Or il est facile de voir que c'est précisément la force verticale qui est exclue de cette combinaison. On ne saurait en effet

¹ J'ai observé moi-même cette disposition dans plusieurs ports ou passages aux limites et au centre de cet intervalle : partout j'ai vu au moins les couches s'approcher beaucoup plus de la verticale au sommet de la montagne qu'à sa base. Elle est parfaitement caractérisée au port de Vénasque qui fait partie de notre coupe : c'est l'éventail renversé. M. Marrot dans son excellent mémoire sur les mines de Rancié (a), cite la structure en éventail droit dans le passage qui mène de France en Andorre. Enfin Ramond l'indique au sommet du Mont-Perdu, et j'adois citer ses paroles qui sont remarquables : « Mais aux approches des pics, dit-il, la position change tout à coup; dans les bases (méridionales) de celui du Mont-Perdu je trouvai les bancs coquilliers se redressant au Sud et plongeant au Nord sous un angle d'environ 45°, inclinaison exactement contraire à celles des bancs semblables qui constituent la base septentrionale du même pic. Il est donc certain que les couches de cette montagne forment un *éventail ouvert* dont les rayons verticaux constituent ses cimes, disposition tout-à-fait singulière et *précisément inverse de celle qu'un soulèvement aurait pu produire.* »

Ainsi le mode de structure dont je parle est général pour la crête centrale des Pyrénées. La fig. 2, pl. II, empruntée aux coupes de M. Thurmann, la montre dans l'axe de la chaîne du Mont-Terrible (Jura Suisse) d'une manière plus instructive, parce que les terrains dans leur ordre géologique sont répétés symétriquement de part et d'autre.

(a) Annales des mines, 11^e série, tome IV.

considérer la structure en question que comme un ploïement poussé jusqu'à sa limite, de manière à rapprocher complètement, et jusqu'à la juxta position, les plans inférieur ou supérieur des couches rompues, et il est bien évident qu'un soulèvement vertical ne saurait avoir joué aucun rôle dans un tel effet. Car si l'on plaçait le siège de cette action soulevante en dehors de l'axe montagneux, pourquoi toutes les couches n'auraient-elles pas plongé dans le même sens, au lieu de diverger symétriquement de part et d'autre? Et si on le place au-dessous même de l'axe, comment les couches ont-elles pu y devenir verticales? Ainsi d'une part la symétrie, de l'autre la verticalité centrale, rendent la forme dont il s'agit incompatible avec un soulèvement de bas en haut, et ne laissent place à aucune autre hypothèse qu'à celle d'une double compression horizontale agissant de part et d'autre du massif par deux efforts opposés¹.

Tel est donc en définitive l'unique agent du soulèvement général des chaînes, ce sont des forces qui saisissant leur masse entière et l'étreignant comme entre les mâchoires d'un immense étau, l'ont reployée sur elle-même en mille replis, et en ont élevé les crêtes par refoulement, par écrasement latéral.

Un phénomène de compression ayant agi dans des proportions aussi colossales, et se répétant à diverses époques avec un aussi remarquable caractère de généralité, ne saurait dériver que d'une grande loi physique, commune à tout le globe. Si en effet élargissant le cercle de nos idées nous considérons que des chaînes entières de plusieurs centaines de lieues ne

¹ La structure en éventail *droit*, celle dont le caractère est que les couches plongent de chaque côté vers l'axe de la montagne, est affectée particulièrement par les montagnes à cime granitique: c'est celle du Mont-Blanc, du Saint-Gothard, de la Maladetta. Elle ne paraît plus tenir alors à un reploïement, car le granit a dû être originairement inférieur au schiste qu'il semble surmonter; je l'attribuerai soit à l'affaissement du granit même après son soulèvement igné, par des raisons que nous exposerons plus tard, soit surtout à ce que sous ce granit résident des matières plus compressibles qui ont cédé plus que le sommet au double effort horizontal. Nous verrons quelle liaison existe entre cette conjecture et les sources minérales qui s'échappent généralement des flancs de ces massifs.

sont qu'une série d'ondulations énormes, à axes rectilignes et disposés par groupes parallèles; que ces ondes se propagent encore transversalement bien au-delà de chacune de ces chaînes, et qu'elles les relient à d'autres protubérances lointaines par de vastes ensembles de directions identiquement orientées; si nous considérons qu'à part quelques phénomènes d'éruption d'une médiocre portée, l'ensemble de ces ridements ne saurait relever que d'un refoulement par pression... Quelle idée ne prendrons-nous point de ces forces horizontales qui à tant de reprises ont étreint d'aussi grandes portions de la surface de la terre? Où donc résidait leur action, et ne serait-elle que purement locale? Le peut-elle être?

M. Elie de Beaumont paraît être le premier géologue qui ait systématisé l'idée de ces ridements horizontaux, en les considérant sous le point de vue de leur généralité d'action sur toute la terre. Ce n'est pas que l'on n'eût encore attribué les montagnes à des causes générales: cette idée était au contraire fortement entrée dans la science, surtout depuis Saussure, et s'il y a même quelque reproche à adresser aux premiers géologues, c'est d'avoir presque toujours trop facilement généralisé. Les belles recherches de M. de Humboldt sur la constance dans la direction générale des formations anciennes, celles de Saussure, Pallas, Ebel, Maclure, Palassou, Boué, sur la conformité entre la direction des couches et celle des chaînes sur de grandes étendues, avaient tenu d'ailleurs depuis longtemps l'attention en éveil sur la vaste portée du phénomène des ridements montagneux, considéré comme phénomène d'ensemble.

Mais autre chose est d'attribuer des phénomènes locaux à une cause générale, ou de considérer l'action de cette cause comme générale à un instant donné, et comme embrassant pour ainsi dire tout le globe dans la simultanéité de ses effets: Tel est le caractère scientifique qu'a eu la grande idée de M. Elie de Beaumont, c'est ainsi qu'elle doit être conçue. Elle n'a été présentée du reste que comme l'appendice d'un système plus positif, étayé sur des bases d'observation, dont ce savant enrichissait en même tems l'étude ou pour mieux dire l'histoire de la terre.

Il ne m'appartient pas de retracer dans leur détail les recherches systématiques de M. Elie de Beaumont et les résultats qui en dérivent : on ne saurait déplacer des écrits originaux un ensemble de faits et d'idées qui ont si fortement marqué dans la science récente. Je dois donc me borner à un rapide énoncé.

Le premier trait distinctif de cette belle étude, un de ceux qui marquent dans l'ordre des grandes idées, c'est d'avoir cherché à rattacher l'élévation successive des chaînes de montagnes à la séparation des formations géologiques : cette seule pensée tendait en effet à généraliser aussi largement que possible le phénomène de soulèvement, trop souvent personnifié comme action locale, et c'était aussi un acheminement vers l'extension *universelle* de cette grande division en époques, que les observations des géologues avaient si bien établie déjà dans nos contrées. Depuis longtemps les opinions semblaient se réunir sur ce point fondamental, que l'origine et la fin de chacune de ces formations distinctes avait été marquée par un cataclysme ; d'autre part on considérait aussi comme moyen absolu de séparation entr'elles la discordance dans l'inclinaison des strates superposées, phénomène si intimement lié à l'élévation des montagnes. Et cependant la pensée n'avait point surgi encore de réunir ces deux ordres de faits par une simultanéité de conception et d'en chercher d'une manière exacte la coordination mutuelle. Telle a été l'heureuse idée de M. Elie de Beaumont, et c'est dans le principe des directions qu'il a su trouver de grandes lois propres à la réaliser.

Depuis que l'attention des géologues avait été portée sur l'étude des directions, presque tous les grands observateurs voyant se résumer chaque chaîne de montagne en un faisceau principal de directions parallèles, avaient considéré chacune d'elles comme un seul tout, tirant son origine d'une cause unique, sinon instantanée. M. de Buch avait été plus loin, et dans son classement des montagnes d'Allemagne, il avait établi une succession chronologique entre les divers systèmes de soulèvements linéaires qui accidentent cette contrée. Etendant ces principes et y appliquant un point de vue nouveau, M. de Beau-

mont a non seulement eu l'idée de rattacher les soulèvements divers à la séparation des âges géologiques, mais il a su déduire encore d'un remarquable groupement d'observations cette loi si importante et si nouvelle, que tous les soulèvements de même époque, ou produits par le même cataclysme, étaient parallèles entr'eux, et se signalaient par une direction unique : de sorte que tout dans les révolutions du globe se trouvait ramené à l'unité.

L'application la plus immédiate de ces principes a été d'assigner, d'après une large et judicieuse étude des faits de stratification, une succession d'âge régulière et continue entre les principales chaînes rectilignes de nos contrées ou les diverses branches qui les constituent. Admettant du reste dans ces ridements parallèles de chaque époque des axes principaux de soulèvement, M. Elie de Beaumont a choisi pour chacune d'elles un type caractéristique, qui a donné son nom à tout le système. Je n'entre point dans les détails de ce classement, qu'il faut lire dans les écrits de l'auteur, mais nous aurons à en rappeler les principaux traits lorsque nous en serons venus à exposer les résultats systématiques de notre étude.

Bien que par une prudente réserve M. Elie de Beaumont n'ait fait porter en réalité, les applications positives de son système que sur la partie occidentale de l'Europe, mieux livrée aux investigations des géologues; cependant ses données conjecturales s'étendent beaucoup au-delà. L'idée du parallélisme sur de notables portions de la sphère terrestre entraîne nécessairement celle de lignes circulaires, car à elles seules sur la sphère appartient cette propriété : aussi M. Elie de Beaumont fut-il porté à introduire cette considération nouvelle dans la haute étude des chaînes de montagnes, dans celle de leur rapport avec le globe entier, et c'est à ce savant en effet qu'appartient l'honneur d'avoir observé le premier que parmi les principales chaînes de montagnes quelques-unes ont des prolongements lointains sur un même grand cercle, et que les ridements particuliers à une même époque peuvent embrasser

une demi circonférence de la terre ¹ : observation d'un ordre tout nouveau, dont l'importance n'a pas encore été assez appréciée; elle porte pour ainsi dire en elle, ainsi que nous espérons le faire voir, toute la théorie des révolutions terrestres, et elle en révèle les véritables causes comme elle en marque sur le relief de la sphère les traits les plus saisissables.

Les idées que nous venons de rappeler, avec les faits qui les appuient, ont été accueillies par la masse impartiale des géologues avec tout l'intérêt qui doit s'y attacher, et l'on peut dire qu'elles ont imprimé un mouvement inusité et pour ainsi dire une forme nouvelle à la géologie d'observation. Cherchant à assigner une succession régulière dans la direction des forces qui ont élevé les montagnes, elles tendaient en effet à asservir à des lois ce qui n'était autrefois considéré que comme des monuments de la perturbation et du désordre; et indiquant un âge pour chacune de nos chaînes, elles semblaient personnifier et animer ces grands reliefs du sol terrestre; c'était enfin relativement à l'histoire de la terre un des premiers jalons sur la route du passé, c'était un des plus heureux efforts pour renouer les feuillets épars des antiques annales du globe.

Ces idées ont toutefois rencontré aussi d'ardentes oppositions : les uns n'apercevant point l'explication théorique immédiate des grands faits annoncés, ont cru qu'il était plus simple

¹ Tel est en effet l'énoncé de M. Elie de Beaumont, mais nous pensons qu'il ne dit pas assez, et l'on verra que les ridements s'étendent en réalité à une circonférence entière.

M. de Beaumont n'est pas très explicite du reste sur le sens qu'il attache au parallélisme des ridements sur de grandes étendues : tantôt il les considère comme appartenant à des arcs de grand cercle très rapprochés, tantôt comme parallèles à un même grand cercle. Ces deux modes sont cependant très différents, et si l'on adopte le second, la position du grand cercle devient très importante, car elle peut changer complètement la direction pour une contrée un peu éloignée. Mais il n'y a que la théorie qui puisse guider dans cette alternative, et jusqu'ici ses données n'étaient pas assez précises; on verra que le parallélisme absolu, celui des petits cercles de la sphère, comprenant entr'eux un équateur, est celui auquel nous avons dû exclusivement nous arrêter, et qui forme la base de toutes nos recherches.

de les nier, et ils ont rejeté comme imaginaire le parallélisme des ridements contemporains; les autres ont cru pouvoir abattre le système entier par l'énoncé de quelques irrégularités ou de quelques lacunes dans les détails de son application. A ceux-ci nous dirons que des irrégularités ne sauraient infirmer une loi, si elle est indiquée d'ailleurs par une série de faits réels : tout ce qu'elles peuvent prouver, c'est que l'étude de cette loi n'est pas assez avancée encore, c'est que l'observation et la théorie n'ont pas encore assez fait pour son établissement, mais elles ne lui ôteront pas son caractère; car nous croyons qu'il est de principe que dans les phénomènes naturels tout ce qui porte l'apparence de loi relève d'une loi en effet, et se rattache de quelque manière à une formule simple et constante. Quant à ceux qui refusent d'admettre comme possible le principe du parallélisme des ridements et de l'unité de direction pour chaque époque, ou qui ne jugent point que sa recherche mérite un intérêt spécial, je leur demanderai si le parallélisme des ondulations du sol dans une même chaîne est déjà un phénomène si simple et qui n'appelle pas seul une haute étude? Celui-là on ne saurait le nier, il est d'observation immédiate. Or le parallélisme des chaînes contemporaines n'en est qu'une extension, qui ne présente guère à l'esprit plus de difficulté que le fait simple. La persistance d'une même direction dans tout le travers et la longueur d'une chaîne de montagne comme les Pyrénées, l'Oural ou un chaînon des Alpes, paraît aussi difficile à expliquer dans son échelle restreinte, que dans son prolongement plus lointain et même sur tout le contour de la terre : la théorie a-t-elle en effet jamais porté sa lumière sur ce simple fait des mouvements alignés?

S'il fallait attendre, pour arriver à des idées générales, que toute la terre ait été observée pied à pied, il faudrait renoncer pour un bien long tems à toute grande conclusion géologique, et la science serait destituée de son plus beau privilège, celui d'étendre par la pensée et le calcul le domaine de l'observation. A elle aussi cependant appartient le pouvoir d'établir, par voie de déduction, des faits encore inconnus sur des bases aussi certaines que si l'expérience les avait vérifiés; à elle en un

mot, aussi bien qu'à l'observation, appartient le droit de généraliser.

Mais pour devenir général, le principe du parallélisme des ridements contemporains (que nous regardons comme démontré dans les limites restreintes de l'observation de nos contrées) a-t-il, à défaut d'une observation universelle, reçu cette sanction de la théorie? Nous le dirons avec cette franchise que réclament les questions scientifiques, nous pensons qu'il ne l'a point encore reçue. Son savant auteur, il est vrai, a bien mis en avant une conjecture théorique destinée à expliquer les ridements montagneux et qui doit être placée, sous le point de vue dynamique, parmi les plus ingénieuses qui aient été produites jusqu'à ce jour; mais fût-elle reconnue exacte dans tout ce qu'elle suppose, elle ne va pas jusqu'à la question de parallélisme, et il pourrait même arriver que l'on soutint qu'elle lui est directement contraire. Portant bientôt plus avant l'examen il nous faudra même en venir à cette conclusion, que l'hypothèse dont nous parlons, toute brillante et ingénieuse qu'elle soit, repose sur une base plus qu'incertaine, et qu'elle est inhabile même à expliquer le fait fondamental du soulèvement tel que nous l'observons; de sorte que ce grand phénomène n'aurait réellement pas encore d'explication scientifique satisfaisante.

Je puis et je dois dire toutes ces choses sans qu'elles infirment en rien la sincère admiration que je professe pour les grandes vues et les brillantes recherches dont M. Elie de Beaumont a enrichi la science géologique: ce n'est pas sur une simple conjecture théorique que sont fondés ses titres au suffrage et à la reconnaissance des savants; et il y a quelque chose de plus beau sans doute que les théories, c'est la première observation des grands faits qui doivent leur servir de base. La théorie dont nous parlons, quelle que soit sa portée définitive, serait d'ailleurs bien loin dans tous les cas d'être superflue pour la science. M. de Beaumont y a consacré en effet pour la première fois le principe des ridements par des forces horizontales et par une réaction universelle de l'écorce du globe sur elle même; il y indique en même tems l'indépendance du

soulèvement des chaînes par rapport à l'éruption des roches plutoniques : sous ce double point de vue cette théorie restera toujours comme une conception de la portée la plus élevée et de la plus grande utilité pour les progrès de la science.

C'est dans le refroidissement du globe que M. Elie de Beaumont a cherché la cause des grands phénomènes de soulèvement. La contraction de l'enveloppe terrestre avait été considérée déjà comme cause dans les phénomènes géologiques, et on avait attribué à sa pression les déjections des volcans. M. Elie de Beaumont a pris pour base le fait inverse, à savoir l'excès de contraction qu'il attribue à la partie interne du globe relativement à son enveloppe extérieure. « Le refroidissement séculaire, dit ce savant, c'est-à-dire la diffusion lente de cette chaleur primitive à laquelle les planètes doivent leur forme sphéroïdale, et la disposition généralement régulière de leurs couches du centre à la circonférence, par ordre de pesanteur spécifique, présente un élément auquel il me semble depuis longtems que ces effets extraordinaires pourraient être rattachés. Cet élément est le rapport qu'un refroidissement aussi avancé que celui des corps planétaires établit sans cesse entre la capacité de leur enveloppe solide et le volume de leur masse interne. Dans un tems donné, la température de l'intérieur des planètes s'abaisse d'une quantité beaucoup plus grande que celle de leur surface, dont le refroidissement est aujourd'hui presque insensible. Nous ignorons sans doute quelles sont les propriétés physiques des matières dont l'intérieur de ces corps est composé; mais les analogies les plus naturelles portent à penser que l'inégalité de refroidissement dont on vient de parler doit mettre leurs enveloppes dans la nécessité de diminuer sans cesse de capacité, malgré la constance presque rigoureuse de leur température, pour ne pas cesser d'embrasser exactement leurs masses internes dont la température décroît sensiblement. Elles doivent par suite s'écarter légèrement et d'une manière progressive de la figure sphéroïdale qui leur convient, et qui correspond à un maximum de capacité; et la tendance graduellement croissante à revenir à une figure à peu près de cette nature, soit qu'elle agisse seule, ou qu'elle se combine

avec les autres causes intérieures de changement que les planètes peuvent renfermer, pourrait peut-être rendre complètement raison de la formation subite des rides et des diverses tubérosités qui se sont produites par intervalles dans la croûte extérieure de la terre, et probablement aussi de tous les autres corps planétaires.¹ »

Ayant à produire moi-même des idées d'un tout autre ordre sur les causes de l'élevation des chaînes de montagnes, on me pardonnera, je l'espère, de chercher à signaler les points vulnérables d'une idée théorique, fort utile en résultat, qui a été émise par un géologue aussi distingué. Mais il importe, avant d'exposer les conceptions qui nous sont propres, et qui vont soulever tant de paradoxes, de bien établir l'état actuel de la science, ses besoins et ses lacunes. Lorsque l'on aura vu combien les plus délicates des théories récentes sont encore loin de la simple expression des faits, l'attention des savants se trouvera sans doute disposée à écouter avec plus d'indulgence le développement des idées nouvelles, quelle que soit leur apparente étrangeté. J'ai lieu de penser du reste que l'idée systématique dont nous venons de citer le court énoncé n'est point considérée par son auteur comme le dernier mot dans la théorie de la terre; qu'elle n'a été proposée par lui que comme une manière, sans contredit ingénieuse, de relier par des vues synthétiques plus ou moins conjecturales des principes géologiques incontestables et de hautes recherches d'application; qu'il ne serait pas éloigné enfin d'accepter libéralement toute autre conception qui s'appliquerait d'une manière plus efficace à l'étude et aux causes des grandes lois géologiques dont il a contribué pour une si belle part à jeter les fondements. C'est donc librement et sans préoccupation de personnes que nous pouvons examiner cette conjecture, en la considérant d'abord dans ses conséquences géologiques.

Nous remarquerons en premier lieu qu'elle laisse en dehors de toute explication les deux traits caractéristiques du soulèvement qu'il semblait le plus intéressant d'expliquer, savoir l'ali-

¹ *Rech. sur les révolutions du globe.* Man. de M. de la Bèche. p. 665.

gnement et le parallélisme. Une comparaison, triviale peut-être, mais que je crois exacte, rendra plus complètement ma pensée. Lorsque le desséchement amené par le tems fait rider la surface d'un fruit, cette modification s'opère par un procédé analogue à ce qui est indiqué pour le globe par la conjecture théorique dont nous parlons. Devenue trop étendue par le retrait de la partie intérieure et cependant attirée par elle en tous ses points, l'écorce de ce fruit se reploie sur elle-même et rachète par ces plissements son excédant de capacité. L'analogie est donc complète. Mais a-t-on remarqué jamais que ces rides végétales fussent parallèles entre elles? A-t-on remarqué qu'elles s'étendent circulairement sur tout ou portion du contour? Entrecroisées en tous sens et grimaçant de la façon la plus capricieuse, elles se distinguent au contraire par l'absence de toute régularité. Pourquoi donc en serait-il autrement sur le globe? Et s'il en est autrement en effet, cette circonstance remarquable n'appelle-t-elle pas une explication spéciale? N'exclut-elle pas la théorie des ridements par la simple contraction due au refroidissement?

Mais il est deux autres particularités du phénomène des soulèvements qui échappent plus complètement encore à l'hypothèse qui nous occupe : la première concerne les relations de ce phénomène avec la marche continue des tems. L'instantanéité des grands bouleversements du sol est passée pour ainsi dire en axiôme parmi les géologues, depuis que l'on a reconnu que toutes les couches d'une même formation ont toujours obéi aux mêmes mouvements, depuis enfin que l'on se sert des discordances de stratification comme moyen de distinction entre les terrains de deux époques; rien au reste ne fait ressortir ce caractère avec plus de force que la loi même du parallélisme des ridements.

Or si l'on vient à mettre en regard de ce bouleversement instantané, de ce subit et périodique fracassement d'une grande portion de la surface du globe, la lente continuité de la diffusion calorifique dans une masse sphéroïdale, quel contraste ne vient-il pas en ressortir? Est-il possible que l'énergie de cette cause incessamment agissante s'emmagasiné pendant des milliers de siècles pour faire tout à coup explosion? Quelle si grande rigidité a donc la mince enveloppe solide de la terre pour résister

ainsi pendant d'immenses périodes à des forces qui la sollicitent en tous ses points? et croira-t-on qu'elle puisse demeurer en suspens au-dessus de la masse interne qui s'affaisse?

Mais il y a plus : admit-on comme possible cette soudaineté d'action à de périodiques intervalles; admit-on comme possible l'unité d'alignement dans les ridements de chaque époque : qui saura dire par quelle singularité dynamique la *direction* de ces mouvements a pu non seulement rester sans relation avec l'axe de figure de l'ellipsoïde terrestre, mais encore changer si complètement à chaque effort apparent de la contraction? Il est rationnel de penser cependant que dans cette série d'effets intermittents dus à des forces continues qui agissent toujours dans le même sens, il est rationnel de penser, dis-je, que les premiers ridements une fois déterminés ont dû constituer des lignes de moindre résistance, suivant lesquelles les forces devaient continuer à agir et dont elles ne pouvaient, ce semble, s'écarter si brusquement. ¹

Ainsi donc tout ce qui porte le caractère de loi dans les soulèvements de montagnes échappe à la théorie dont nous parlons; tout ce qu'ils ont eu de brusque et de variable lui échappe également. Ajoutons enfin que leur intensité paraît s'élever bien au-dessus des moyens d'action qu'elle met en œuvre, en admettant même que son principe fût réel : c'est ce que l'on peut vérifier en cherchant à mettre en rapport la grandeur absolue des ridements de quelques époques avec les décroissements de températures sensibles à la surface du sol.

On peut prendre à cet effet différents points de repère dans la série des âges géologiques, car nous avons dans la végétation fossile une sorte d'élément thermométrique rigoureusement appréciable, et nous avons aussi dans les hauteurs qu'atteignent les terrains de chaque âge au-dessus de la mer où ils ont été déposés, un élément dynamique propre à faire calculer approximativement l'amplitude de la contraction. Choisissons

¹ L'angle mutuel de deux systèmes linéaires consécutifs est toujours considérable, dans le tableau des directions de M. Elie de Beaumont.

par exemple pour point de départ le commencement de la période tertiaire, où les palmiers croissaient dans nos latitudes : cela suppose une diminution actuelle d'environ 10° de température moyenne. Or que s'est-il opéré dans cet intervalle, relativement aux mouvements du sol ? Le soulèvement des plus hautes chaînes : les Pyrénées, les Alpes, le Caucase, l'Atlas, l'Himalaya, les Andes ! Mettant du reste à part toute considération hypothétique sur les époques réelles où les *sommets* de ces montagnes ont été portés à leur hauteur actuelle, nous aurons toujours une limite inférieure incontestable de l'élévation que nous cherchons, dans celle où ont été portés les terrains secondaires les plus récents, que l'on sait être très élevés dans ces chaînes. Comme toutes ces chaînes appartiennent du reste à quatre systèmes de soulèvements distincts, on peut additionner les nombres relatifs à chacune d'elles pour avoir la somme des plus grandes augmentations qu'a reçues le rayon terrestre depuis l'époque crétacée jusqu'à nos jours. Cette somme est, comme on le peut conjecturer d'après les observations, d'environ 20,000 mètres. Or d'après ce que l'on sait de l'amplitude et du nombre des ridements dans les chaînes de montagnes, de leur multiplicité indéfinie dans le sens transversal et dans les chaînes parallèles, il est probable qu'il faudrait plus que décupler cette hauteur de ridements pour avoir le chiffre du développement circulaire qui lui correspond et qui exprime l'étendue linéaire dont un grand cercle du globe a dû se replier sur lui-même. Contentons-nous de la tripler, ou de porter à 60,000 mètres la réduction du contour de ce grand cercle depuis l'époque que nous considérons ; il est aisé de voir qu'elle indique une diminution de 500,000 kilom. cubes dans le volume intérieur, ou de $\frac{1}{72}$. Cette réduction est par hypothèse, la conséquence d'un abaissement de température de 10° ; pour 1° ce serait $\frac{1}{720}$. Or on sait que le coefficient de dilatation absolue du mercure n'est que de $\frac{1}{5550}$, celui du fer de $\frac{1}{22700}$. Il faudrait donc pour que la théorie fût au niveau des faits, que l'intérieur du globe eût une puissance de contraction huit fois et demie plus considérable que celle du mercure et trente fois plus que celle du fer à l'état solide.

Ajoutons que nous avons raisonné comme si l'écorce solide du globe ne se contractait pas elle-même, tandis que les longueurs obtenues n'indiquaient en réalité que la différence de contraction entre la masse interne et son enveloppe... Admettre un pareil résultat comme expression de cette différence serait passer les limites du possible.

Ce serait assez, à mes yeux, de toutes les considérations précédentes pour accuser au point de vue géologique l'insuffisance de la théorie des contractions. Mais il y a lieu d'en examiner le principe au point de vue physique, cette recherche nous donnera lieu d'ailleurs de citer ou d'établir quelques résultats qui nous serviront plus tard à une déduction importante, celle de la fluidité intérieure d'une certaine portion du globe terrestre.

L'accroissement progressif de la température dans les profondeurs observables au-dessous de la surface de la terre ne laisse plus de doute aujourd'hui sur la chaleur intérieure qu'elle recèle et par conséquent sur son refroidissement. Mais ce qui n'était pas aussi bien connu avant les grands travaux analytiques de Fourier, c'est la lenteur extrême de la diffusion de cette chaleur, soit à l'extérieur soit à l'intérieur du globe. C'est lui qui a établi comme l'on sait, que la température de la surface de la terre n'est plus affectée que de $\frac{1}{30}$ de degré par l'influence du foyer intérieur, la température étant supposée augmenter de 1° par trente mètres de profondeur près de la surface du sol; et il ajoutait qu'il faudrait plus de 30,000 ans pour que la raison de cette progression diminuât de moitié. Mais ce qu'il est important de signaler et ce qui est éminemment contraire à la théorie précédente, c'est que le mouvement de cette chaleur est beaucoup plus lent à l'intérieur du globe que près de sa surface. « L'expression mathématique de la loi du refroidissement montre, dit Fourier, ¹ que la chaleur primitive contenue dans une masse sphérique d'une aussi grande

¹ Remarques générales sur la température du globe terrestre etc... annales de chimie et de physique, octobre 1824.

dimension que la terre, *diminue beaucoup plus rapidement à la superficie* que dans les parties situées à une grande profondeur. Celles-ci conservent presque toute leur chaleur durant un tems immense, et il n'y a aucun doute sur la vérité des conséquences, parce que nous avons calculé ces tems pour des substances métalliques plus conductrices que les matières du globe. »

Un illustre analyste dont les sciences ont à regretter la perte récente, M. Poisson, a soumis ce sujet à des nouvelles investigations et les résultats auxquels il est parvenu, moins connus que ceux de Fourier, sont plus propres encore à donner une idée complète de la lenteur infinie avec laquelle se répand la chaleur, des profondeurs de la terre à sa surface. ¹ Supposant que toute la masse du globe ait été animée, à l'origine, d'une température uniforme de 3.000°, M. Poisson parvient à ce résultat, qu'il faudrait *un million de siècles* pour que la température de la surface n'en fût plus affectée que de $\frac{1}{30}$ de degré, avec l'accroissement de 1° par trente mètres de profondeur, c'est-à-dire qu'elle arrivât à l'état actuel; et qu'il faudrait encore 3.000.000 de siècles pour que ces petites fractions se réduisissent à moitié. Quant au centre de la terre, il faudrait dans la même hypothèse mille millions de siècles ² pour qu'il perdît un millionième de sa chaleur d'origine... Ce qui peut donner une idée de l'incroyable excès du refroidissement de la surface du globe par rapport au refroidissement central. Le même mémoire fournit d'ailleurs des évaluations suffisantes pour prouver que même à une médiocre profondeur au-dessous de la surface, la marche du refroidissement est comme insensible. M. Poisson trouve en effet que, dans la même hypothèse d'une température initiale de 3000°, un point situé à une profondeur seulement du vingtième du rayon ter-

¹ Ces résultats sont consignés dans le mémoire servant de supplément à la théorie de la chaleur, 1837; note C.

² Même mémoire, page 153.

restre, ou de 75 lieues, n'aurait pas perdu trois millièmes de degré après un refroidissement de trois millions de siècles¹.

Ce n'est donc pas seulement un décroissement considérable dans le mouvement de la température avec la profondeur, qui nous est indiqué par les merveilleux efforts de l'analyse ; c'est, relativement aux révolutions du globe, l'infini tout entier placé entre la théorie et les faits.

Il est cependant possible d'ajouter quelque chose encore à ce que ces résultats ont de négatif, en rappelant une cause de lenteur dont on ne paraît pas avoir tenu compte dans les calculs : elle se rapporte au cas, dont nous prouverons la réalité par la suite, ou il subsisterait encore sous l'écorce solide du globe terrestre une zone fluide, reste de cette fluidité extérieure originaire qui lui a imprimé sa forme ellipsoïdale.

On sait qu'un corps liquide en se solidifiant abandonne la portion de calorique, nommée chaleur latente, qui lui était nécessaire pour maintenir ses molécules dans cet état d'indifférence attractive qui constitue la liquidité. Dans un corps comme la terre, la déperdition de chaleur dérivant nécessairement de la surface, tant que cette surface a été fluide le mouvement de température dans l'intérieur a dû être continu et indéfini, chaque couche empruntant, pour ainsi dire, à celle qu'elle enveloppait une quantité de chaleur en relation avec leur différence mutuelle. Mais dès que le froid de la surface a pu faire soli-

¹ L'énormité de ces nombres avait porté M. Poisson à rejeter l'idée de la chaleur centrale comme cause de l'accroissement de température que nous trouvons dans les profondeurs observables : il imagine qu'elle peut y avoir pénétré par la surface même et qu'elle est due à l'inégalité de la chaleur rayonnante des espaces que parcourt notre système planétaire entraîné avec le soleil dans un mouvement de révolution dont le foyer nous est inconnu et dont la période est encore inappréciable. Bien que le mouvement de notre système ne soit plus douteux comme principe astronomique, les géologues auraient bien de la peine à goûter l'hypothèse de M. Poisson relativement à la chaleur rayonnante des espaces, au moins depuis les âges géologiques où rien n'indique en réalité la trace d'une chaleur générale excessive, surtout pendant un long espace de tems. Nous aurons occasion, par la suite, de fournir quelques idées différentes sur les sources possibles de la chaleur du globe par sa surface.

difier une simple pellicule superficielle, tout mouvement de la chaleur dans la masse fluide (si ce n'est celui qui résulte de la progression déjà établie) a dû s'arrêter aussitôt, pour se concentrer à sa surface, à sa zone de jonction avec l'enveloppe solide.

En effet chaque couche qui se solidifie ne cédant du côté de l'extérieur exactement que ce qu'il faut de calorique pour sa solidification, elle tend à donner à la couche inférieure une portion de la chaleur latente qu'elle abandonne, au lieu de lui emprunter; ou plutôt elle ne lui emprunte ni ne lui cède, arrêtant ainsi tout nouveau mouvement intérieur et n'y laissant subsister que celui qui tend à y établir l'uniformité complète. Il ne m'appartient point de rechercher jusqu'à quel point un semblable principe atténue la marche du refroidissement général, mais il est visible qu'il annule définitivement, s'il en était encore besoin, toutes les considérations que l'on pourrait fonder sur la contraction du volume interne des planètes, et pose un dernier obstacle infranchissable à ce qu'elle puisse être considérée comme un instrument géologique.

Si donc toutes les théories fondées sur le refroidissement du globe tombent ainsi d'elles-mêmes, si de plus il est démontré par l'observation, que l'action volcanique n'est qu'un phénomène isolé et secondaire, sans relation de cause à effet avec les mouvements généraux du sol caractérisés par des lignes droites; où sera donc la cause de ces bouleversements instantanés qui à diverses reprises ont ridé et refoulé, peut-être dans son ensemble, la surface de la terre? Où sera la cause de ce parallélisme des ridements contemporains, que l'observation de nos contrées élève à une probabilité si grande? Où sera la cause du renouvellement simultané des races et de cette interversion de toutes les conditions climatiques? Où sera-t-elle?

Nous le dirons bientôt, et dans cette étude il faudra que nous sachions faire entrer comme principes géométriques, nécessaires, toutes les conditions physiques que nous avons rappelées ou démontrées dans ce chapitre; elles peuvent se grouper de la manière suivante;

I. Les soulèvements montagneux , dans leur acception la plus générale , sont caractérisés par la propriété de l'alignement , c'est-à-dire que les couches relevées s'y prolongent toujours suivant des directions *rectilignes* , directions qu'elles conservent sur de notables portions du contour de la sphère.

II. Les forces générales auxquelles ces soulèvements sont dus ont agi *horizontalement* , c'est-à-dire que leur cause réside dans une réaction de l'écorce du globe sur elle-même.

III. Ces forces ont été brusques , instantanées , et leur action a coïncidé avec les grands cataclysmes qui ont mis fin à chaque formation et renouvelé sur la surface de la terre les conditions principales du développement organique.

IV. A chacune des époques de soulèvement la direction des forces a été uniforme , elle a produit des ridements *parallèles* , pouvant comprendre entr'eux un grand cercle de la sphère ; cette direction a *changé* au contraire à chaque changement de formation , à chaque nouvel effort instantané ,

Telles sont les données du problème des révolutions terrestres en ce qui concerne l'élévation des montagnes : ces données sont vastes , précises , impérieuses ; elles sont telles , que seules elles pourraient suffire à faire admettre ou condamner une théorie. Elles imposent donc de grandes et sévères conditions , mais aussi elles doivent fournir des vérifications puissantes lorsqu'on dispose d'une idée féconde. Nous en acceptons toute la portée.

Mais il nous faut faire concourir à cette recherche d'autres phénomènes encore , et en premier lieu il nous faut poursuivre les considérations relatives au mouvement de la chaleur , en les appliquant à la surface même du globe et à ses divers états climatiques ; afin de démontrer qu'une loi de décroissement régulière et continue est bien loin de pouvoir y satisfaire à l'exigence des faits , et qu'ils réclament dans leur ensemble de plus hardis efforts de la théorie.